

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

Курс лекций по дисциплине  
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Составитель:  
Е.А. Киндеев

Владимир 2016

## 1. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК.

### **Больше, чем симметрия.**

Стандартная модель элементарных частиц считается крупнейшим достижением физики второй половины XX века. Но что лежит за ее пределами?

Стандартная модель (СМ) элементарных частиц, базирующаяся на калибровочной симметрии («ПМ» № 1'2013), – великолепное творение Мюррея Гелл-Манна, Шелдона Глэшоу, Стивена Вайнберга, Абдуса Салама и целой плеяды блестящих ученых. СМ прекрасно описывает взаимодействия между кварками и лептонами на дистанциях порядка 10–17 м (1% диаметра протона), которые можно изучать на современных ускорителях. Однако она начинает буксовать уже на расстояниях в 10–18 м и тем более не обеспечивает продвижения к заветному планковскому масштабу в 10–35 м.

Считается, что именно там все фундаментальные взаимодействия сливаются в квантовом единстве. На смену СМ когда-нибудь придет более полная теория, которая, скорее всего, тоже не станет последней и окончательной. Ученые пытаются найти замену Стандартной модели. Многие считают, что новая теория будет построена путем расширения списка симметрий, образующих фундамент СМ. Один из наиболее перспективных подходов к решению этой задачи был заложен не только вне связи с проблемами СМ, но даже до ее создания.

### **Смесь противоположностей.**

*В конце 1960-х старший научный сотрудник теоретического отдела ФИАН Юрий Гольфанд предложил своему аспиранту Евгению Лихтману обобщить математический аппарат, применяемый для описания симметрий*

*четырёхмерного пространства-времени специальной теории относительности (пространства Минковского).*

Лихтман обнаружил, что эти симметрии можно объединить с внутренними симметриями квантовых полей с ненулевыми спинами. При этом образуются семейства (мультиплеты), объединяющие частицы с одинаковой массой, обладающие целым и полуцелым спином (иначе говоря, бозоны и фермионы). Это было и новым, и непонятным, поскольку те и другие подчиняются разным типам квантовой статистики. Бозоны могут накапливаться в одном и том же состоянии, а фермионы следуют принципу Паули, строго запрещающему даже парные союзы этого рода. Поэтому возникновение бозонно-фермионных мультиплетов выглядело математической экзотикой, не имеющей отношения к реальной физике. Так это и было воспринято в ФИАН. Позже в своих «Воспоминаниях» Андрей Сахаров назвал объединение бозонов и фермионов великой идеей, однако в то время она не показалась ему интересной.

Лихтман в 1971 году защитил диссертацию, а потом ушел в ВИНТИ и почти забросил теорфизику. Гольфанда уволили из ФИАН по сокращению штатов, и он долго не мог найти работы. Однако сотрудники Украинского физико-технического института Дмитрий Волков и Владимир Акулов тоже открыли симметрию между бозонами и фермионами и даже воспользовались ею для описания нейтрино. Правда, никаких лавров ни москвичи, ни харьковчане тогда не обрели. Лишь в 1989 году Гольфанд и Лихтман получили премию АН СССР по теоретической физике имени И.Е. Тамма. В 2009 году Владимир Акулов (сейчас он преподает физику в Техническом колледже Городского университета Нью-Йорка) и Дмитрий Волков (посмертно) удостоились Национальной премии Украины за научные исследования.

### **Рождение суперсимметрии.**

В 1971 году была построена модель, в которой с каждой вибрацией бозонного типа сочеталась парная ей фермионная вибрация. Правда, эта модель работала не в четырехмерном пространстве Минковского, а в двумерном пространстве-времени струнных теорий. Однако уже в 1973 году австриец Юлиус Весс и итальянец Бруно Зумино доложили в ЦЕРН (а годом позже опубликовали статью) о четырехмерной суперсимметричной модели с одним бозоном и одним фермионом. Она не претендовала на описание элементарных частиц, но демонстрировала возможности суперсимметрии на наглядном и чрезвычайно физичном примере. Вскоре эти же ученые доказали, что обнаруженная ими симметрия является расширенной версией симметрии Гольфанда и Лихтмана. Вот и получилось, что в течение трех лет суперсимметрию в пространстве Минковского независимо друг от друга открыли три пары физиков.

Результаты Весса и Зумино подтолкнули разработку теорий с бозонно-фермионными смесями. Поскольку эти теории связывают калибровочные симметрии с симметриями пространства-времени, их назвали суперкалибровочными, а потом суперсимметричными. Они предсказывают существование множества частиц, ни одна из которых еще не открыта. Так что суперсимметричность реального мира все еще остается гипотетической. Но даже если она и существует, то не может быть строгой, иначе электроны обладали бы заряженными бозонными родичами с точно такой же массой, которых легко можно было бы обнаружить. Остается предположить, что суперсимметричные партнеры известных частиц чрезвычайно массивны, а это возможно лишь при нарушении суперсимметрии.

Суперсимметричная идеология вошла в силу в середине 1970-х годов, когда уже существовала Стандартная модель. Естественно, что физики принялись строить ее суперсимметричные расширения, иными словами,

вводить в нее симметрии между бозонами и фермионами. Первая реалистичная версия суперсимметричной СМ, получившая название минимальной (Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM), была предложена Говардом Джорджи и Савасом Димопулосом в 1981 году. Фактически это та же Стандартная модель со всеми ее симметриями, но к каждой частице добавлен партнер, чей спин отличается от ее спина на  $1/2$ , – бозон к фермиону и фермион к бозону.

Поэтому все взаимодействия СМ остаются на месте, но обогащаются взаимодействиями новых частиц со старыми и друг с другом. Позднее возникли и более сложные суперсимметричные версии СМ. Все они сопоставляют уже известным частицам тех же партнеров, но различным образом объясняют нарушения суперсимметрии.

### **Частицы и суперчастицы.**

*Названия суперпартнеров фермионов строятся с помощью приставки «с» – сэлектрон, смюон, скварк. Суперпартнеры бозонов обзаводятся окончанием «ино»: фотон – фотино, глюон – глюино, Z-бозон – зино, W-бозон – вино, бозон Хиггса – хиггсино.*

Спин суперпартнера любой частицы (за исключением бозона Хиггса) всегда на  $1/2$  меньше ее собственного спина. Следовательно, партнеры электрона, кварков и прочих фермионов (а также, естественно, и их античастиц) имеют нулевой спин, а партнеры фотона и векторных бозонов с единичным спином – половинный. Это связано с тем, что количество состояний частицы тем больше, чем больше ее спин. Поэтому замена вычитания на сложение привела бы к появлению избыточных суперпартнеров.

Возьмем для примера электрон. Он может находиться в двух состояниях – в одном его спин направлен параллельно импульсу, в другом – антипараллельно. С точки зрения СМ это разные частицы, поскольку они

не вполне одинаково участвуют в слабых взаимодействиях. Частица с единичным спином и ненулевой массой может пребывать в трех различных состояниях (как говорят физики, имеет три степени свободы) и потому не годится в партнеры электрону. Единственным выходом будет приписать каждому из состояний электрона по одному суперпартнеру с нулевым спином и считать эти сэлектроны различными частицами.

Суперпартнеры бозонов Стандартной модели возникают несколько хитрее. Поскольку масса фотона равна нулю, то и при единичном спине он имеет не три, а две степени свободы. Поэтому ему без проблем сопоставляется фотино, суперпартнер с половинным спином, который, как и электрон, обладает двумя степенями свободы. По этой же схеме возникают глюино. С хиггсами ситуация посложнее. В MSSM есть два дублета хиггсовских бозонов, которым соответствует четверка суперпартнеров – два нейтральных и два разноименно заряженных хиггсино. Нейтралы смешиваются разными способами с фотино и зино и образуют четверку физически наблюдаемых частиц с общим именем нейтралино. Подобные же смеси со странным для русского уха названием чарджино (по-английски – chargino) образуют суперпартнеры положительного и отрицательного W-бозонов и пары заряженных хиггсов.

Своей спецификой обладает и ситуация с суперпартнерами нейтрино. Если бы эта частица не имела массы, ее спин всегда был бы направлен противоположно импульсу. Поэтому у безмассового нейтрино можно было бы ожидать наличие единственного скалярного партнера. Однако реальные нейтрино все же не безмассовы. Не исключено, что существуют также нейтрино с параллельными импульсами и спинами, но они очень тяжелы и еще не обнаружены. Если это действительно так, то каждой разновидности нейтрино соответствует свой суперпартнер. Как говорит профессор физики

Мичиганского университета Гордон Кейн, самый универсальный механизм нарушения суперсимметрии связан с тяготением.

Однако величина его вклада в массы суперчастиц еще не выяснена, а оценки теоретиков противоречивы. Кроме того, он вряд ли является единственным. Так, Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model, NMSSM, вводит еще два хиггсовских бозона, вносящих свои добавки в массу суперчастиц (а также увеличивает число нейтрино с четырех до пяти). Такая ситуация, отмечает Кейн, резко умножает число параметров, заложенных в суперсимметричные теории.

Даже минимальное расширение Стандартной модели требует около сотни дополнительных параметров. Этому не стоит удивляться, поскольку все эти теории вводят множество новых частиц. По мере появления более полных и согласованных моделей число параметров должно уменьшиться. Как только детекторы Большого адронного коллайдера отловят суперчастицы, новые модели не заставят себя ждать.

### **Иерархия частиц.**

*Суперсимметричные теории позволяют устранить ряд слабых мест Стандартной модели. Профессор Кейн на первое место ставит загадку, связанную с бозоном Хиггса, которую называют проблемой иерархии.*

Эта частица приобретает массу в ходе взаимодействия с лептонами и кварками (подобно тому, как они сами обретают массы при взаимодействии с хиггсовским полем). В СМ вклады от этих частиц представлены расходящимися рядами с бесконечными суммами. Правда, вклады бозонов и фермионов имеют разные знаки и в принципе могут почти полностью погасить друг друга. Однако такое погашение должно быть практически идеальным, поскольку масса хиггса, как теперь известно, равна лишь 125 ГэВ. Это не невозможно, но крайне маловероятно.

Для суперсимметричных теорий в этом нет ничего страшного. При точной суперсимметрии вклады обычных частиц и их суперпартнеров должны полностью компенсировать друг друга. Поскольку суперсимметрия нарушена, компенсация оказывается неполной, и бозон Хиггса обретает конечную и, главное, вычисляемую массу. Если массы суперпартнеров не слишком велики, она должна измеряться одной-двумя сотнями ГэВ, что и соответствует действительности. Как подчеркивает Кейн, физики стали серьезно относиться к суперсимметрии именно тогда, когда было показано, что она решает проблему иерархии.

На этом возможности суперсимметрии не заканчиваются. Из СМ вытекает, что в области очень высоких энергий сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия хотя и обладают примерно одинаковой силой, но никогда не объединяются. А в суперсимметричных моделях при энергиях порядка  $10^{16}$  ГэВ такое объединение имеет место, и это выглядит намного естественней. Эти модели предлагают также и решение проблемы темной материи. Суперчастицы при распадах порождают как суперчастицы, так и обычные частицы – естественно, меньшей массы. Однако суперсимметрия, в отличие от СМ, допускает быстрый распад протона, которого, на наше счастье, реально не происходит.

Протон, а вместе с ним и весь окружающий мир можно спасти, предположив, что в процессах с участием суперчастиц сохраняется квантовое число R-четности, которое для обычных частиц равно единице, а для суперпартнеров – минус единице. В таком случае самая легкая суперчастица должна быть полностью стабильной (и электрически нейтральной). Распасться на суперчастицы она не может по определению, а сохранение R-четности запрещает ей распадаться на частицы. Темная материя может состоять именно из таких частиц, возникших сразу вслед за Большим взрывом и избежавших взаимной аннигиляции.



### **В ожидании экспериментов.**

Незадолго до открытия бозона Хиггса на основе М-теории (наиболее продвинутой версии теории струн) его массу предсказали с ошибкой всего в два процента! Были также вычислены массы сэлектронов, смюонов и скварков, которые оказались слишком велики для современных ускорителей – порядка нескольких десятков ТэВ. Суперпартнеры фотона, глюона и прочих калибровочных бозонов намного легче, и поэтому есть шансы их обнаружить на БАК.

Конечно, правильность этих вычислений ничем не гарантирована: М-теория – дело тонкое. И все же, можно ли обнаружить на ускорителях следы суперчастиц? «Массивные суперчастицы должны распадаться сразу после рождения. Эти распады происходят на фоне распадов обычных частиц, и однозначно выделить их очень непросто, – объясняет главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики ОИЯИ в Дубне Дмитрий Казаков. – Было бы идеально, если бы суперчастицы проявляли себя уникальным образом, который невозможно спутать ни с чем другим, но теория этого не предсказывает.

Приходится анализировать множество различных процессов и искать среди них те, которые не вполне объясняются Стандартной моделью. Эти поиски пока не увенчались успехом, но у нас уже есть ограничения на массы суперпартнеров. Те из них, которые участвуют в сильных взаимодействиях, должны тянуть как минимум на 1 ТэВ, в то время как массы прочих суперчастиц могут варьировать между десятками и сотнями ГэВ.

В ноябре 2012 года на симпозиуме в Киото были доложены результаты экспериментов на БАК, в ходе которых впервые удалось надежно

зарегистрировать очень редкий распад  $B_s$ -мезона на мюон и антимюон. Его вероятность составляет приблизительно три миллиардных, что хорошо соответствует предсказаниям СМ. Поскольку ожидаемая вероятность этого распада, вычисленная на основе MSSM, может оказаться в несколько раз большей, кое-кто решил, что с суперсимметрией покончено.

Однако эта вероятность зависит от нескольких неизвестных параметров, которые могут давать как большой, так и малый вклад в конечный результат, здесь еще много неясного. Поэтому ничего страшного не произошло, и слухи о кончине MSSM сильно преувеличены. Но из этого вовсе не следует, что она неуязвима. БАК пока не работает на полную мощность, он выйдет на нее лишь через два года, когда энергию протонов доведут до 14 ТэВ. И вот если тогда не найдется никаких проявлений суперчастиц, то MSSM, скорее всего, умрет естественной смертью и настанет время новых суперсимметричных моделей.

Однако есть и другая стратегия, не связанная с БАК. Пока в ЦЕРН работал электронно-позитронный коллайдер LEP, на нем искали наиболее легкие из заряженных суперчастиц, чьи распады должны порождать наилегчайших суперпартнеров. Эти частицы-предшественники легче зарегистрировать, поскольку они заряжены, а легчайший суперпартнер нейтрален. Эксперименты на LEP показали, что масса таких частиц не превышает 104 ГэВ. Это не так уж много, но их трудно обнаружить на БАК из-за высокого фона. Поэтому сейчас началось движение за постройку для их поиска сверхмощного электрон-позитронного коллайдера. Но это очень дорогая машина, в скором времени ее уж точно не построят».

### **Закрываются и открываются.**

*Однако, как считает профессор теоретической физики Университета Миннесоты Михаил Шифман, измеренная масса бозона Хиггса слишком велика для MSSM, и эта модель, скорее всего, уже закрыта:*

«Правда, ее пытаются спасти с помощью различных надстроек, но они столь неизящны, что имеют малые шансы на успех. Возможно, что другие расширения сработают, но когда и как, пока неизвестно. Но этот вопрос выходит за рамки чистой науки. Нынешнее финансирование физики высоких энергий держится на надежде обнаружить на БАК что-то действительно новое. Если этого не произойдет, финансирование урежут, и денег не хватит для строительства ускорителей нового поколения, без которых эта наука не сможет реально развиваться». Так что суперсимметричные теории по-прежнему подают надежды, но ждут не дождутся вердикта экспериментаторов.

### **БОЛЬШАЯ ОХОТА НА ХИГГСА**

4 июля 2012 года было официально объявлено, что эксперименты по поиску бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК) с очень высокой степенью вероятности увенчались успехом.

Зачем физикам вообще понадобился этот бозон? Симметрии Стандартной модели (см. «ПМ» № 3'2012) запрещают элементарным частицам иметь ненулевые массы. Проблему можно обойти, если предположить, что все пространство заполнено особого рода полем, которое нарушает эти симметрии и придает массу всем частицам, за исключением фотона, глюона и, возможно, нейтрино.

По традиции, заложенной в 1966 году американским физиком Бенджамином Ли, его называют полем Хиггса. В СМ фигурирует четыре хиггсовских поля и, соответственно, четыре скалярных бозона, три из которых не имеют массы. Они наделяют массой векторные бозоны  $W^+$ ,  $W^-$  и

Z, но сами при этом исчезают. А вот массивный квант четвертого поля, который может появляться в результате столкновения частиц высоких энергий, на очень короткое время возникает в качестве самостоятельной частицы. Он-то и есть бозон Хиггса, или просто хиггс.

### **Загон для бозона.**

Теория не дает возможности определить массу хиггсовского бозона – это можно сделать только экспериментально. Долгое время не удавалось сделать даже приблизительных оценок этой массы, была известна лишь ее верхняя граница – примерно 1000 ГэВ.

СМ позволяет вычислить вероятности различных способов (каналов) рождения и распада хиггса в экспериментах на ускорителях. Однако результаты этих вычислений сильно зависят от его массы, которая изначально неизвестна. С другой стороны, необходимы хотя бы гипотетические значения этих вероятностей, иначе следы распадов попросту утонут в великом множестве прочих событий, следующих за столкновениями высокоэнергетичных частиц.

Поэтому задолго до начала экспериментов на ускорителях теоретики обсчитали вероятности различных процессов рождения и распада хиггса. Первая такая работа была опубликована еще в 1975 году, хотя ее авторы рассматривали процессы, характерные для массы бозона 10 ГэВ (возможности ускорителей в то время были ограничены).

Но с начала 1990-х годов, когда началась настоящая охота на неуловимую частицу, физики постепенно стали огораживать красными флажками области масс, где хиггса быть не может. С 1989 по 2000 год в ЦЕРНе функционировал Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP), для которого был сооружен подземный круговой 27-км туннель (сейчас там находится главное кольцо БАК).

Энергию столкновения частиц в LEP, которая вначале не превышала 90

ГэВ, со временем удалось увеличить более чем вдвое. Анализ экспериментов LEP показал, что масса хиггса не может быть меньше 114,4 ГэВ. С 2007 по 2011 год его искали на американском протон-антипротонном ускорителе Tevatron, что еще более сузило (правда, статистически не слишком достоверно) диапазон масс хиггса – до 115–135 ГэВ.

Обнародованные в конце 2011 года результаты экспериментов на БАК позволили предположить, что масса хиггса находится точно в середине этого интервала, в промежутке между 124 и 126 ГэВ. Поэтому экспериментальные данные 2012 года обсчитывали на основе допущения, что она составляет 125 ГэВ.

### **Протонная сборка.**

В отличие от LEP и Tevatron, где сталкиваются частицы и античастицы, БАК оперирует только протонами. В 2010–2011 годах их энергия составляла 3,5 ТэВ, а в 2012 году возросла до 4 ТэВ. В феврале этого года БАК закрыли до 2016 года на модернизацию, по завершении которой энергию частиц в каждом пучке доведут до 7 ТэВ (следовательно, суммарная энергия составит 14 ТэВ), а также увеличат частоту столкновений (светимость коллайдера).

В процессе поиска бозона Хиггса в коллайдере одновременно крутились 500 трлн протонов, сгруппированных приблизительно в 2800 сгустков (банчей). Поиск вели на главных детекторных комплексах коллайдера ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) и CMS (Compact Muon Solenoid). В детекторах управляющие электромагнитные поля сводят протоны с параллельных траекторий и направляют навстречу друг другу.

Хотя в столкновении двух банчей и участвуют сотни миллиардов частиц, в 2011 году среднее число межпротонных соударений на один такой контакт не превышало десятка, а в 2012-м увеличилось до двадцати. Но поскольку банчи пересекались 20 млн раз в секунду, то суммарное количество ежесекундных столкновений измерялось сотнями миллионов.

Лобовой удар двух протонов (которые состоят из кварков и антикварков, скрепленных глюонным полем), разогнанных почти до световой скорости, порождает множество вторичных частиц, среди которых могут встретиться и хиггсы.

### **Отпечатки пальцев.**

Бозон Хиггса не только трудно изготовить – его очень нелегко обнаружить. Время его жизни, согласно СМ, составляет  $1,6 \times 10^{-22}$  с, а расстояние между точками его возникновения и исчезновения не превышает нескольких десятков фемтометров. И хотя детекторы БАК – чудо измерительной техники, столь короткие дистанции они измерить не в состоянии. Поэтому бозон Хиггса можно обнаружить исключительно по продуктам его распада.

И вот тут-то возникают сложности. Если масса хиггса равна 125 ГэВ, то он с вероятностью около 70% превращается либо в пару «b-кварк – b-антикварк», либо в пару глюонов, которые в ходе дальнейших превращений дают начало джетам, коническим струям из десятков частиц. Их легко обнаружить... но очень сложно отличить от джетов нехиггсовского происхождения. Еще в 27% случаев на месте исчезнувшего хиггса возникают W-бозоны или самые массивные лептоны, тау-частицы, которые тоже оставляют в детекторе малоразличимые подписи.

Но природа подарила ученым еще два шанса обнаружить заветный бозон. Будучи электрически нейтральным, он не способен непосредственно производить фотоны, но может сделать это через промежуточную инстанцию. СМ разрешает хиггсу порождать массивные заряженные виртуальные частицы, которые тут же исчезают и оставляют после себя пару гамма-квантов. Хиггс может также превратиться в два нейтральных Z-бозона (тоже виртуальных, иначе нарушится закон сохранения энергии, поскольку удвоенная масса Z-бозона намного больше массы хиггса).

Каждый из них, в свою очередь, распадается на электрон и позитрон или на положительный и отрицательный мюоны, так что в конечном счете хиггс превращается в четверку лептонов. Эти распады дают наиболее четкую подпись в детекторах, но их суммарная вероятность очень мала: при массе хиггса в 125 ГэВ она равна 0,23% для двухфотонного канала и 0,013% – для четырехлептонного. Ведь такому тяжеловесу, как хиггс, гораздо легче трансформироваться в массивные частицы, нежели в фотоны, электроны и мюоны.

### **Официальное представление.**

Поиск иголки в стоге сена – детская забава по сравнению с охотой на хиггса. Так, коллаборация CMS за полтора года экспериментов выявила лишь пять (!) четырехлептонных событий, которые должны следовать за распадом хиггса на пару Z-бозонов. Тем не менее оба коллектива не только зарегистрировали рождение «хиггсоподобной» частицы (электрически нейтральной, с целочисленным спином, не равным единице, и положительной четностью) с очень низкой вероятностью ошибки, но и практически одинаково оценили ее массу:  $126,0 \pm 0,6$  ГэВ (ATLAS) и  $125,3 \pm 0,6$  ГэВ (CMS).

Июльские результаты содержали и мелкие неожиданности. Новая частица проявляла себя в двухфотонном канале распада в полтора раза чаще, нежели ей предписано СМ. Распадов хиггса на b-кварки и W-бозоны заметить не удалось (на это физики особо и не надеялись), но экспериментаторы не обнаружили и следов распада хиггса на тау-частицы, хотя шансов на их выявление было несколько больше. Участники коллаборации ATLAS также заявили о расхождении в оценках масс новой частицы, выявленных в двухфотонном и четырехлептонном каналах.

В первом случае она практически совпала с прежней величиной, но во втором оказалась меньше приблизительно на 3 ГэВ. Это тем более странно,

что коллаборация CMS месяцем раньше (в ноябре 2012 года) опубликовала собственную уточненную оценку массы частицы по ее четырехлептонному распаду, которая практически совпала с июльской оценкой. Физики склоняются к мнению, что обнаруженная нестыковка объясняется статистическими флуктуациями.

### **Физика: старая или новая?**

«Повышенная частота распадов предполагаемого хиггса на пару гамма-квантов еще не нашла однозначного объяснения. Рождение и исчезновение виртуальных частиц-посредников вполне может увеличить частоту событий двухфотонного канала по сравнению с ожиданиями Стандартной модели, – комментирует сложившуюся ситуацию физик-теоретик из Калифорнийского технологического института Шон Кэрролл, автор недавно вышедшей книги о поисках бозона Хиггса. – Поэтому данные по двухфотонному распаду могут оказаться знаменем новой физики. Но это лишь гипотеза, и не исключено, что их удастся объяснить в рамках СМ».

Как полагает Кэрролл, расхождение в 3ГэВ между массами бозонов тоже можно списать на новую физику. Но в этом случае придется признать, что обнаружены распады двух разных, но очень похожих бозонов. Придумать теорию, допускающую сосуществование таких бозонов, сложно.

Возможно, все гораздо проще: число обнаруженных распадов чрезвычайно мало, и даже небольшие различия в оценках масс, вычисленных на базе каждого отдельного события, способны заметно изменить итоговый результат. Поэтому нестыковка, скорее всего, исчезнет по мере накопления и уточнения экспериментальных данных.

По мнению Кэрролла, все опубликованные данные по новой частице пока не ставят на повестку дня коррекцию Стандартной модели. Ситуация может измениться в 2015 году, когда БАК запустят после модернизации. А до тех пор СМ ничего не угрожает. Научное сообщество считает так же: в начале



марта 2013 года на прошедшей в Италии научной конференции Moriond-2013 были доложены результаты анализа практически всех показаний детекторов БАК, накопленных в 2011–2012 годах. Общий вывод уже не звучал как сенсация: новооткрытая частица все больше напоминает бозон Хиггса – в том виде, как он описывается Стандартной моделью.

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТРЕБНОСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА.

### **НЕЛИШНЯЯ ЭНЕРГИЯ**

Любая энергетическая сеть загружена неравномерно – грубо говоря, днем возникает перерасход, а ночью система «отдыхает». В целях экономии энергию приходится запасать, выдавая излишки в пиковые часы. Существует целый ряд методов хранения, но почти все они, кроме гидроаккумулирующих электростанций, рассчитаны на небольшие объемы. ГАЭС же, в свою очередь, жестко привязана к рельефу и воде. Но существует и другой путь – его разработали российские специалисты из компании «Каспийская энергия».

Энергия не бывает лишней – особенно в условиях перманентного энергетического кризиса и непрекращающегося роста цен на нефть, газ и прочие природные ресурсы. При этом во всем мире системы накопления и оптимизации энергетических расходов находятся, как ни странно, на довольно низком уровне. Значительная часть энергии расходуется впустую из-за неоднородности графика электрической нагрузки и других факторов.

Нередки случаи, когда в моменты переизбытка электроэнергии электростанции вынуждены продавать ее по нулевой (или даже «отрицательной») цене, лишь бы избежать дорогостоящей остановки и последующего пуска.

Сегодня используется несколько способов оптимизации энергосистем. Это и принудительное снижение выработки, и управление потреблением, и,

конечно, аккумуляция электроэнергии. Самый распространенный способ накопления – это ГАЭС, гидроаккумулирующая электростанция (доля ГАЭС в мировых электроаккумулирующих мощностях – 99%).

Принцип ее функционирования прост: ночью, в отсутствие пиковых нагрузок, система использует недорогую, избыточную электроэнергию для перекачки воды в верхнюю емкость (так называемый бьеф), а днем сливает ее в нижний бьеф, вырабатывая пиковую электроэнергию. ГАЭС надежны, хорошо отработаны и позволяют избежать перегрузок, но при этом имеют серьезный недостаток. Суть в том, что гидроаккумулирующая электростанция – это массивная структура, которую можно возвести только в определенных географических зонах, при обязательном наличии воды и перепада высот.

Довольно давно используются накопители другого вида энергии – тепловой. Это устройства, функционирующие по принципу термоса, то есть емкости, заполненные теплоносителем и окруженные теплоизоляцией. Термоаккумуляторы, в частности, применяются для хранения энергии, полученной из возобновляемых источников, – солнечной, ветряной, приливной. Например, паровой аккумулятор накапливает энергию путем нагрева воды с последующим хранением ее под давлением.

Используют в качестве хранилищ и твердые рабочие тела – скажем, бетон. Весьма распространенная разновидность теплоносителей в термоаккумуляторах – это солевые расплавы (про устройство подобных ТА мы вкратце рассказывали в майском номере за 2012 год). Теплоносителем служит расплав смеси нитрата натрия и нитрата калия («солнечная соль», 60%  $\text{NaNO}_3$  и 40%  $\text{KNO}_3$ ).

Расплав хранится в «холодной» камере, прокачивается через солнечные концентраторы и поступает в «горячую» камеру-термос, уже набрав рабочую температуру. При «разрядке» расплав отдает тепло теплообменникам и

поступает обратно в «холодную» камеру. Такие системы, будучи впервые представленными в 1970-х, широко используются в США, Испании и т. д. Главное их преимущество заключается в том, что «солнечная соль» хранится при обычном атмосферном давлении практически без каких-либо изменений, при этом являясь весьма недорогим теплоносителем.

Но тепло, накапливаемое в теплоаккумуляторах, – это еще не энергия. Для превращения тепла в электричество на солнечных электростанциях применяется традиционный принцип: расплав нагревает воду и преобразует ее в пар, который крутит турбину, вращающую генератор. Эффективность системы – всего около 42–44%. Казалось бы, идеальной системы не существует. Но несколько лет назад специалисты «Каспийской энергии» задали себе простой вопрос: можно ли существенно повысить КПД термонакопителя, да еще и не привязывая его к рельефу и воде?

#### **Введение в термодинамику.**

С самого начала было понятно, что подобная система не может быть простой. Группа инженеров во главе с Александром Самойловым шла к результату методом проб и ошибок в течение нескольких лет, и в 2012 году проект впервые был представлен общественности. Причем, как показалось нам при беседе с инженерами, наиболее интересное – это даже не сама идея, а сопровождающие ее дебаты и заблуждения. Впрочем, обо всем по порядку.

Устройство, разработанное «Каспийской энергией», называется термодинамическим накопителем электроэнергии (ТНЭ), и в его конструкции имеется тот самый, давно известный нитратный «термос» с расплавом солей. Но если в случае с солнечными электростанциями расплав служит сердцем конструкции, то в ТНЭ он лишь один из множества элементов, причем вполне заменимый при необходимости.

Если искать в термодинамическом накопителе «сердце», то можно условно назвать им машинную часть – сочетание теплового насоса и

«зеркального» ему теплового двигателя, работающих по циклу Брайтона. В 1872 году американский инженер Джордж Брайтон создал оригинальный поршневой двигатель, работавший по новому, неизвестному до того циклу (ранее существовали циклы Ренкина, Карно, Ленуара и Стирлинга). Цикл состоит из четырех последовательных процессов:

1. изоэнтропическое сжатие (объем смеси уменьшается, давление возрастает);
2. изобарический подвод теплоты (при постоянном давлении);
3. изоэнтропическое расширение (объем смеси растет, давление падает) – рабочий такт;
4. изобарический отвод теплоты (при постоянном давлении).

Сегодня цикл Брайтона хорошо изучен и широко используется. В частности, по нему работают газотурбинные, турбореактивные, воздушно-реактивные ДВС, а на обратном цикле Брайтона основана работа многих низкотемпературных установок. Именно обратимость стала основной причиной использования цикла в ТНЭ. При описанной выше последовательности он становится частью теплового двигателя; если же «проиграть» такты в обратном направлении, получается тепловой насос, то есть устройство, позволяющее отобрать тепло у холодного носителя и передать его теплоту.

### **Все гениальное сложно.**

Обычный нитратный накопитель в качестве входящей энергии принимает тепло, которое можно собрать, например, с помощью солнечного концентратора (батареи). Задачей же инженеров «Каспийской энергии» было создание устройства, способного принимать и отдавать любую энергию. Проще всего было воспользоваться механической энергией в качестве «посредника».

Собственно, вся разработка носит название «Установка накопления,

сохранения и возврата механической энергии» – именно потому, что механическую энергию проще всего преобразовать в любую другую (и наоборот). Вход в систему может осуществляться с помощью электродвигателя, турбины или даже ДВС – главное, чтобы был крутящий момент. Аналогично осуществляется и выход.

А вот дальше начинается интересное. Мотор, приводимый в движение внешним источником, вращает расположенные на одном валу компрессор и турбину, то есть приводит в действие компрессионный тепловой насос, работающий по обратному замкнутому циклу Брайтона. Газовым рабочим телом в насосе может служить воздух, или азот, или аргон, или иные газы и их смеси.

С одной стороны накопителя находятся две емкости «холодного» теплоносителя, с другой – две емкости «горячего». Казалось бы, обычный принцип: перенос энергии от холодного к горячему с последующим ее хранением. Но дело в том, что «горячий» теплоноситель сам по себе представляет тот самый нитратный накопитель, который является основным для сохранения солнечной энергии!

То есть «горячая» часть – это две емкости: «горячая-холодная» (примерно  $+280^{\circ}\text{C}$ ) и «горячая-горячая» (порядка  $+580^{\circ}\text{C}$ ), между которыми переносится тепло через собственный теплообменник. Аналогично и «холодный» теплоноситель состоит из двух емкостей – «холодной-горячей» (примерно  $+20^{\circ}\text{C}$ ) и «холодной-холодной» (примерно  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Это напоминает фрактальную структуру: два независимых накопителя становятся симметричными частями более сложной системы.

При накоплении энергии компрессор сжимает газ, соответственно, повышается температура последнего – таким образом, внешняя механическая энергия преобразовывается в тепловую. Полученное тепло отдается «горячему» теплоносителю, газ охлаждается примерно до первоначальной

температуры и поступает в рекуператор, где отдает еще часть тепла встречному потоку газа, уже отобравшему часть тепла от «холодного» теплоносителя.

Затем газ попадает в турбодетандер (расширитель в виде обычной турбины), где расширяется и еще сильнее охлаждается, становясь практически «ледяным» (при этом часть мощности турбины идет на компрессор). Далее газ подводится к холодному теплоносителю и охлаждает его, отбирая некоторую часть энергии, снова проходит через рекуператор, нагреваясь от встречного потока газа, – и идет в компрессор. Цикл повторяется. Когда весь «холодный» теплоноситель станет очень холодным, а «горячий» – очень горячим, накопитель можно считать заряженным.

Возникает естественный вопрос – зачем такие сложности? Неужели нельзя накапливать энергию, нагревая и перекачивая из «холодной» емкости в «горячую» солнечную соль или какое-то другое вещество? Во-первых, таким способом значительно сложнее получить механическую энергию на выходе. А во-вторых, простым нагреванием невозможно достигнуть КПД аккумуляции, сравнимого хотя бы с эффективностью ГАЭС (до 70%).

Перед разработчиками стояло несколько инженерных задач: подобрать доступные и стабильные теплоносители, обеспечить максимальное изменение их температуры (чем больше это изменение, тем меньше надо расплава) и максимальную разницу температур между «холодным» и «горячим» концами (для повышения эффективности теплового двигателя).

Наконец, надо было наладить передачу тепла от одного вещества (спирта, водно-солевой или водно-спиртовой смеси с температурой замерзания ниже  $-55^{\circ}\text{C}$ ) к другому (собственно «солнечной соли»), несмотря на то что их рабочие диапазоны температур вообще не пересекаются. Для этого и используется теплообменник-рекуператор. Внутри него движутся близкие или равные по расходу противоточковые потоки газа, которые обмениваются

своей температурой таким образом, что почти все тепло передается от одного потока к другому (естественно, с некоторой потерей на теплообмен).

Аналогично, только в обратном порядке, происходит процесс отдачи энергии – тут как раз и используется обратимость цикла Брайтона. При отдаче энергии, теперь уже по прямому циклу, газ, предварительно охлажденный «ледяным» теплоносителем, сжимается в компрессоре, затем нагревается от горячего теплоносителя, после чего вращает турбину, а через нее компрессор и выходной вал. Та же часть накопленной энергии, которая не может быть превращена в полезную работу в силу неидеальности процессов в накопителе, отводится через аппарат воздушного охлаждения (АВО).

### **Взгляд в будущее.**

Цикл работы ТНЭ можно разложить на три составляющих: получение механической энергии; преобразование этой энергии в высокотемпературную и низкотемпературную тепловую посредством теплового насоса; передача тепла от газового рабочего тела жидким теплоносителям и сохранение его в «термосах». Возврат энергии происходит в обратном порядке.

При всей сложности системы преимущества серьезны. Это и значительная компактность (1 м<sup>3</sup> теплоносителей в ТНЭ равен по энергоемкости 220 м<sup>3</sup> воды в Загорской ГАЭС), и независимость от ландшафта. Возвести комплекс ТНЭ можно в любой точке планеты, подключив его к действующей или строящейся электростанции. Кроме того, никаких революционных узлов или технических решений в ТНЭ нет – инженеры сумели собрать этот хитроумный пазл из технологий, которые давно известны и по отдельности используются в различных отраслях.

Что же мешает ТНЭ занять место ГАЭС и повсеместно принять функции экономии и перераспределения энергии? В первую очередь это молодость

проекта – будучи представленным около года назад, он еще не набрал достаточной авторитетности для немедленного строительства. Во-вторых, российское энергетическое законодательство на данный момент делает оказание услуг по аккумуляции энергии невыгодным экономически.

Даже действующих ГАЭС в России всего две – Кубанская и Загорская, хотя проектируется на данный момент еще ряд подобных систем. Несмотря на неприбыльность (строящаяся в настоящее время Загорская ГАЭС-2 практически некупаема, просто крайне нужна энергосистеме), можно предположить, что законодательство и правила рынка так или иначе будут изменяться в сторону поддержки энергонакопления.

Мир очень медленно переходит на принципы экономии: в Китае работает 13 ГАЭС, в США – 11, в Японии – 7, в остальных развитых странах – по одной-две (всего около полусотни). «Непривязанность» ТНЭ к воде открывает перед ним достаточно широкие перспективы. Плюс к тому по сравнению с различными системами запасания энергии ТНЭ достаточно компактен, а удельная стоимость его емкости ниже, чем у конкурентов.

Будет ли реализован подобный проект? Скорее всего, да. По крайней мере, разработчики из «Каспийской энергии» – искренние энтузиасты своей работы – не сомневаются в его реализации в ближайшие 4–5 лет. Пожелаем им удачи – все-таки это значительный прорыв в области энергетики, и первый шаг сделан у нас, в России. Что не может не радовать.

### 3. БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

#### *Службы спасения.*

**Цель:** В поиске жертв катастроф спасателям помогут электронные носы.

**Средство** Специальные устройства на базе определенной системы датчиков быстро выявят в воздухе примеси углекислого газа, аммиака и



ацетона – они могут присутствовать в развалинах, так как жертвы выделяют их в процессе дыхания, а также через пот. Другие датчики засекают те химические вещества, которые выделяют человеческие останки, погребенные под землей на метровой глубине. Вся эта аппаратура способна работать без усталы, когда собаки-ищейки уже вернутся в свои конуры.

### *Пробки.*

**Цель: Компьютеры смогут предсказывать транспортные пробки еще до того, как они будут появляться.**

**Средство** Используя данные из архивов, расположенные вдоль дорог датчики и показания системы GPS, IBM разрабатывает такую программу, которая могла бы предсказывать скопления автомобилей еще за час до того, как они произойдут. Более того, эту идею уже опробовали экспериментально, и она показала свою дееспособность – даже в таком проклятом месте, как платная автострада штата Джерси.

### *Снаряжение.*

**Цель: Куртки с климат-контролем защитят солдат и от сурового холода, и от сильной жары.**

**Средство** Как считает Кранти Вистакула, студент из Массачусетского технологического института, проблему всепогодной одежды можно решить с помощью биметаллических пластин Пельтье. Если пропускать ток через соединение двух разных металлов, такая пластина может либо нагреваться, либо охлаждаться. Снаряжение с использованием подобных пластин оказывается достаточно легким, и американская армия уже приступила к его испытаниям. Такие же испытания проводятся и в армии Индии. Судя по первым отчетам, список желающих опробовать новинку будет быстро расширяться.

### *Транспорт.*

**Цель: Ваш автомобиль обретет полноценную жизнь в сети.**

**Средство** Он будет обмениваться информацией со светофорами (таким образом можно оптимизировать транспортные потоки). Он будет взаимодействовать с другими автомобилями (это поможет избегать столкновений). Он поможет вам запустить любимую музыкальную программу, скачав ее из вашей домашней сети. Он самостоятельно разыщет бензоколонку с самыми низкими ценами и сам расплатится за бензин. Он зафиксирует попытку открыть без разрешения дверь и снимет нарушителя на видео.

### ***Биотехнологии.***

**Цель: К производству автомобильных шин привлекают бактерии.**

**Средство** Главная составляющая резины, изопрен, в природе вырабатывается многими растениями, однако общий объем его производства едва поспевает за растущим спросом на автомобильные шины. Кроме того, изопрен можно вырабатывать из нефти. Сейчас биотехнологическая фирма Genencor вывела генно-инженерным способом новый штамм микробов E.Coli, которые вырабатывают комочки этого вещества в качестве побочного продукта при усвоении сахаров из каких-либо растений. Партнером в этих исследованиях выступает компания Goodyear, и она уже сейчас приступила к испытаниям шин, изготовленных из данного биоизопрена.

### ***Вирусы.***

**Цель: Цифровые «муравьи» защитят энергосеть от кибертерроризма.**

**Средство** Эрин Фалп, специалист по вопросам безопасности в Университете Уэйк-Форест, Северная Каролина, разработал цифровых ищущих, странствующих по различным сетям в поисках тех или иных угроз. Принцип их работы позаимствован из животного мира: «легалые» чуют «цифровой след» примерно так же, как их живые собратья чуют струи запахов. Когда подобный цифровой муравей выявляет в сети какую-либо проблему, в то же место спешат и другие муравьи, чтобы самостоятельно

разобраться с замеченным беспорядком. Скопление цифровых насекомых становится видно и оператору. Так он узнает, в какой части системы возникли неувязки.

### ***Космос.***

**Цель: Подготовка к межпланетным путешествиям.**

**Средство** «Мы продолжаем развиваться как биологический вид, и вполне здравым было бы предположение, что мы будем осваивать другие планеты, но перед этим стоило бы засылать на них 3D-принтеры, чтобы они до нашего прибытия создавали там для нас всю инфраструктуру».

Дэйв Эванс, штатный футуролог Popular Mechanics и главный эксперт в вопросах техники в компании Cisco Systems.

### ***Генетика.***

**Цель: Ваш геном будет расшифрован еще до вашего рождения.**

**Средство** В Университете штата Вашингтон группа под руководством Джея Шендура недавно сумела реконструировать геном плода, используя в качестве источника информации слюну отца и образец крови матери (таким образом была получена свободно плавающая ДНК ребенка). Позже анализ крови из пуповины подтвердил, что секвенирование оказалось верным на 98%. Когда стоимость такой процедуры будет снижена до приемлемого уровня, она позволит проводить массовое неинвазивное пренатальное тестирование.

### ***Медицина.***

**Цель: Лучевую болезнь будут лечить посредством инъекций.**

**Средство** Благодаря серьезной заинтересованности, проявленной со стороны министерства обороны США, сейчас в Управлении по контролю за продуктами и лекарствами дождется проверки сразу несколько лечебных методик. Одна из них, Ex-Rad, в ходе клинических испытаний не только предотвратила долгосрочное повреждение клеток, но и способствовала

восстановлению костного мозга.

### ***Идентификация.***

**Цель:** Компания IBM уверена, что через пять лет пароли станут не нужны.

**Средство** Apple и Google разрабатывают программы, которые позволят мобильникам опознавать ваше лицо. DARPA анализирует персональную динамику взаимодействия человека с клавиатурой. В других компаниях занимаются сканированием радужки, характеристиками голоса и отличительными персональными особенностями пульса.

### ***Экология.***

**Цель:** Самоочищающиеся здания помогают бороться со смогом.

**Средство** Как только солнечные лучи упадут на алюминиевую обшивку этих зданий, их покрытие из двуокиси титана начинает испускать свободные радикалы, которые разлагают налипшую на стены копоть, а также преобразуют рассеянные в воздухе ядовитые молекулы окиси азота в безвредные нитраты. Все отходы этого процесса беспрепятственно смываются дождем.

### ***Информация.***

**Цель:** Объемы хранящихся данных будут измеряться в зеттабайтах.

**Средство** Как заявила International Data Corporation, в 2010 году впервые за всю историю человечества объем всей информации, сгенерированной за год на планете, превзошел один зеттабайт. К концу нынешнего года этот показатель достиг 2,7 зеттабайта. Как можно наглядно представить себе этот самый «зеттабайт»? Допустим, каждый байт соответствует песчинке. Тогда количество песка, «вмещающегося» в зеттабайт, будет по объему соответствовать четырём сотням плотин имени Гувера.

### ***Вакцины.***

**Цель:** Для борьбы с эпидемиями будут использовать генетическое

## **тестирование.**

**Средство** Год назад сотрудники Национального института исследования человеческого генома и врачи из Мэриленда изучали корни одной из опасных бактериальных инфекций. Новизна этих исследований состояла в том, что в нем широко использовали секвенирование генома в режиме реального времени. Оно помогло идентифицировать малейшие мутации микробов, выяснить пути их распространения и оперативно поставить перед ними непреодолимую преграду.

### ***Наркозависимость.***

**Цель:** С помощью лекарственных препаратов можно будет полностью освободить людей от наркозависимости.

**Средство** Иммунная система человека нацелена на выявление и нейтрализацию инородных веществ. Так почему бы не настроить ее и на те вещества, с которыми мы боремся? Эта идея легла в основу разработки вакцин против наркозависимости. Заставим наш организм выделять антитела, блокирующие молекулы наркотика еще до того, как они попадают в мозг. Этот подход испытан на мышах. Опыты на людях ведутся прямо сейчас.

### ***Одежда.***

**Цель:** Ваша одежда будет самоочищаться.

**Средство** Китайские инженеры разработали покрытие из двуокиси титана, помогающее хлопковой ткани самостоятельно избавляться от пятен и выводить бактерии, испускающие неприятный запах. Допустим, вы провели ночь за страстной игрой в покер. Но вот вы выходите на солнечный свет, и ваша пропотевшая и засаленная рубашка обретает девственную свежесть.

### ***Кухня.***

**Цель:** Вегетарианцы и мясоеды смогут питаться за одним столом.

**Средство** Биз Стоун, один из основателей Твиттера, сейчас начал финансировать компанию Beyond Meat. Она производит растительные

суррогаты, которые так похожи на куриное филе, что почти ввели в заблуждение специалиста по этой части Марка Битмана, постоянного кулинарного обозревателя New York Times.

### *Библиотеки.*

**Цель:** Все 130 млн книг, имеющих на планете, будут переведены в цифровую форму.

**Средство** В 2010 году компания Google пообещала выполнить эту работу к концу десятилетия. Правда, к марту ей оставалось переработать еще 110 млн томов, так что мы склонны называть сроки с некоторым допуском. Опять же потребуется некоторое время, чтобы обзавестись необходимым количеством носителей. Если ориентироваться на сегодняшние технические возможности и считать средний размер электронной книги равным 3 мегабайтам, нам потребуется 124 внешних винчестера, каждый емкостью по 3 терабайта. Вот теперь мы можем повсюду носить с собой всю библиотеку человечества. В обычный рюкзачок такое количество знаний, пожалуй, не влезет, а вот большая спортивная сумка вполне подойдет.

### *Процессоры.*

**Цель:** Будут построены суперкомпьютеры размером с кубик рафинада.

**Средство** Весь вопрос в том, чтобы запустить в производство новое поколение компьютерных чипов. Если сейчас структура чипа такова, что его элементы выстраиваются бок о бок, то в будущем, как считают разработчики из IBM, элементы микрочипов будут взаимодействовать друг с другом через посредство капелек жидкости, внесенных в нужные места с помощью наночастиц. Так будут устранены лишние проводники и улучшится отвод тепла. Правда, никто не поможет вам вспомнить, куда вы, отходя ко сну, задевали свой компьютер.

### *Дорожное движение.*

**Цель: Шоссе при том же количестве полос смогут пропускать втрое больше автомобилей.**

**Средство** Если верить исследователям из Колумбийского университета, когда машинами управляют живые люди, в каждый отдельно взятый момент они эффективно используют от силы 5% дорожного пространства. Если же отобрать баранку у людей и передать ее под начало чего-то электронно-технического, количество машин, проходящих по шоссе, можно будет существенно увеличить. Одним из примеров такого решения можно считать полуавтономный дорожный поезд, реализованный компанией Volvo. Это некая колонна грузовиков, объединенных между собой радиосвязью, где головную машину ведет шофер-профессионал, а остальные машины, электронно управляемые, поддерживают ту же скорость и совершают те же маневры, что и лидер. В результате интервал между машинами можно уменьшить, не платя за это повышенной опасностью. Кроме того, в подобной колонне машины расходуют меньше горючего.

### *Сверхчеловек.*

**Цель: «Морские котики» смогут задерживать дыхание на четыре часа.**

**Средство** Успехи в сфере нанотехнологии помогут нам не только бороться с болезнями, но и расширить пределы человеческих возможностей. Так, к примеру, микророботы, выполняющие функции красных кровяных телец (их назвали респироциты), могут захватывать в 200 раз больше кислорода, чем их природные аналоги. В результате диверсант из «морских котиков» сможет по полдня прятаться под водой, обходясь без акваланга.

### *Домостроительство.*

**Цель: Свой дом вы сможете вырастить самостоятельно.**

**Средство** Вполне добротный дом будет формироваться из живых, дышащих деревьев, сплетенных в изощренные конструкции. В отличие от производителей нарисованного здесь игрушечного домика, компания Fab

Tree Nab заявляет, что вырастить полноценное жилище у нее получится не быстрее, чем за пять лет. Вырастив такой дом, его можно будет пересадить в любое удобное для вас место.

#### 4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В марте текущего года многочисленные технические СМИ опубликовали сенсационную новость: ученые из Чжэцзянского университета в Ханчжоу получили наилегчайший материал в мире – аэрогель на основе графена, кубический сантиметр которого весит всего 0,16 мг. Но это же в семь с половиной раз легче воздуха! Здесь явно какой-то подвох – может ли твердое вещество однородной структуры быть столь легким?

Аэрогель – это странный, очень странный материал. У него нет практически ни одного свойства, в которое можно сразу, без доказательств поверить. Лишь подержав брусок аэрогеля в руках или хотя бы посмотрев видеозаписи, где это делает кто-либо другой, начинаешь понимать: похоже, это правда. Являясь твердым материалом, он на 99,8% состоит из воздуха и при этом способен выдерживать вес, превышающий его собственный в 4000 раз (!), что говорит о нечеловеческой прочности.

Аэрогели огнеупорны, воздухопроницаемы, способны впитывать воду или масло, могут – в зависимости от материала изготовления – служить электрическим проводником или не менее эффективным изоляционным материалом. 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 за кубический сантиметр, и это не считая серьезных временных затрат. А время, как известно, это самый дорогостоящий ресурс. Так или иначе, на сегодняшний день аэрогель значительно дороже золота. Второй недостаток –



чрезмерно малая пластичность, то есть аэрогели очень хрупкие. Они выдержат давление, но не удар.

### **Аэрогель на кухне?**

В принципе, изготовить аэрогель в домашних условиях можно. Но это будет очень дорого, сложно, и с высокой долей вероятности результат окажется несколько отличным от ожиданий. «Исходником» служит гель – материал (а точнее, дисперсная система), состоящий из двух компонентов – макромолекулярной сетки и низкомолекулярного растворителя, заполняющего поры сетки. «Наполнителем» может служить вода, спирт, углеводороды, а структурой – диоксид кремния, оксид алюминия, желатин и т. д. В аэрогеле же жидкий наполнитель заменяется воздухом, и получается пористая структура.

Первый аэрогель был получен из так называемого алкогеля – силикагеля (структуры, образованной растворами кремниевых кислот), поры которого были заполнены спиртом. Казалось бы, что может быть проще, достаточно извлечь жидкую составляющую и заменить газообразной. Но если провести такую операцию грубо, то структура «схлопнется» и деформируется. Поэтому получение аэрогеля предполагает определенные трудности.

Простейший способ, который использовал в 1920-х годах изобретатель аэрогеля Сэмюэл Кистлер, выглядит следующим образом. Сперва гель нагревается до критической точки – такой температуры и давления, при которой свойства жидкости и газа не различаются между собой. Затем давление понижается при сохранении критической температуры – при этом вещество сохраняет газообразное состояние.

Затем, второй ступенью, снижается и температура – спирта в структуре при этом слишком мало, чтобы он мог конденсироваться обратно в жидкость, и поры геля остаются наполненными газом (воздухом). В итоге мы получаем

недеформированную структуру – аэрогель. Звучит несложно, но построить на кухне устройство для приведения геля к критической температуре, а тем более к давлению – задача не из тривиальных. Но, спешим заметить, это вполне возможно, и прецеденты есть.

### **Исходный продукт.**

Аэрогель можно сделать из значительного количества материалов – различных полимеров, металлов и т. д. Наиболее распространены в промышленности (если это можно назвать «распространением») три типа: на базе силикагелей, углеводов и оксидов металлов. Чаще всего в экспериментах используют первый тип.

Силика-аэрогели выглядят воздушно-голубыми. Их окраска объясняется тем, что материал содержит большое количество частиц силики (оксида кремния) и заполненных воздухом или газом пор нанометровых размеров, которые рассеивают коротковолновое излучение (синий и фиолетовый) лучше, чем длинноволновое. То есть по той же самой причине, почему небо в ясный день имеет голубой оттенок: за счет рассеяния света на молекулах газов в атмосфере.

Аэрогели на основе углеродных гелей черные, напоминают и на вид, и на ощупь уголь, только очень легкий. Имея очень большую площадь поверхности и будучи хорошими проводниками, они могут использоваться для изготовления суперконденсаторов или топливных элементов. Наконец, аэрогели на базе оксидов металлов используются в качестве катализаторов при химических реакциях, а также при производстве взрывчатых веществ, карбоновых нанотрубок и т. д. В отличие от силикогелевых и углеродных собратьев, металлические аэрогели могут быть разных цветов – в зависимости от используемого металла.

### **Что с этим делать?**

Применяются аэрогели в достаточно широком спектре областей, но, так

сказать, понемногу. 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 млрд километров, «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.

В принципе, в качестве ловушки можно было использовать и другие вещества, но ничто не могло сравниться с аэрогелем по сочетанию «малая масса – высокая адсорбирующая способность». Конечно, не космосом единым жив человек. Для нас значительно более важно не исследовательское, а прикладное применение того или иного изобретения. Интересно, что на ранних стадиях аэрогели пытались применять практически во всех сферах человеческого существования – от косметики до взрывчатки, от сигарет до холодильников.

В 1940-х годах Сэмюэл Кистлер подписал контракт с компанией Monsanto, которая производила и продавала этот материал под торговой маркой Santocel. Содержание воздуха в «сантоселе» составляло порядка 94%. В первую очередь «сантосель» рекламировался как изоляционный материал

для пожароопасных производств, поскольку был негорючим и очень легким.

Его абсорбирующие свойства позволяли использовать его в качестве загустителя в напалмовых бомбах, также он использовался при производстве лакокрасочной продукции и т. д. В течение четверти века Monsanto была единственным производителем аэрогелей в мире, но в 1970-х годах и она свернула производство странного вещества. Слишком мал был спрос, и слишком дорогим и опасным оставалось производство.

Но в 1980-х годах ученые разработали ряд более простых способов получения аэрогеля. Спирт был заменен диоксидом углерода, а применение в технологии изготовления силикагелей алкоголятов кремния снизило токсичность и повысило скорость производства. Аэрогель снова приобрел коммерческую ценность и получил второй шанс.

Ныне аэрогели применяются в различных отраслях промышленности, например при производстве силикона и строительных материалов. Аэрогель можно встретить в красках, косметике, водонепроницаемых 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). Да, стоимость его высока, но при грамотном использовании в определенных местах она выходит даже меньше, нежели при применении традиционных методов. Если в ближайшее время будут разработаны новые, более дешевые методики производства аэрогеля и его стоимость упадет, аэрогель вполне может стать товаром широкого потребления. Как алюминий, нейлон или дерево.

### **Вперед в будущее.**

Исследование аэрогелей продолжается. Перед учеными стоит целый ряд

задач: сделать материал прочнее, дешевле, а также обезопасить его производство. В 2002 году профессор Николас Левентис из Университета науки и технологий штата Миссури объявил о том, что разработал метод производства нехрупкого аэрогеля (раньше хрупкость была одной из основных проблем материала).

Вещества, созданные по методике Левентиса, получили наименование X-аэрогели – они более прочные и эластичные, но, с другой стороны, их производство весьма опасно и занимает больше времени. Ухудшились и изоляционные свойства. X-аэрогели могут найти применение в сфере производства брони, автомобильных шин, самолетов. Углеродные аэрогели можно применять для создания суперконденсаторов и топливных элементов.

Современная наука чаще всего базируется на исследованиях, которые проводятся в хорошо оборудованных лабораториях целыми институтами. Аэрогелем, как ни странно, может заниматься и ученый-одиночка – необходимое оборудование сравнительно доступно. Это открывает достаточно широкие возможности для исследований. В интернете можно найти целые сайты, посвященные методике и рецептам по изготовлению аэрогелей.

Но мы, кажется, так и не ответили на два важных вопроса, заданных в начале материала: действительно ли аэрогель может быть легче воздуха и почему китайский графеновый аэрогель стал сенсацией. Плотность различных аэрогелей обычно варьируется в пределах от 0,001 до 0,5 г/см<sup>3</sup> (чаще всего порядка 0,02 г/см<sup>3</sup>) а плотность воздуха – 0,001225 г/см<sup>3</sup>.

То есть аэрогель действительно может быть немного легче воздуха – такой эффект достигается удалением воздуха из пор и замещением его газом, более легким, чем воздух. Китайские же ученые поставили рекорд, добившись плотности 0,00016 г/см<sup>3</sup>. Предыдущий рекорд сверхмалой плотности принадлежал материалу под названием аэрографит, созданному

год назад немецкими учеными, – его плотность составляла 0,0002 г/см<sup>3</sup>.

Основное достижение китайцев не только в разработке нового метода получения аэрогеля и установлении рекорда, но и в отличных свойствах графенового аэрогеля: он удивительно эластичен (восстанавливается после 90%-ного сжатия) и способен абсорбировать количество жидкости (масла), в 900 раз превышающее его собственную массу. Вполне вероятно, новое вещество станет великолепным улавливателем океанического мусора и, что немаловажно, загрязняющих воду веществ, например нефти.

В общем, широкое практическое применение аэрогелей в повседневной жизни, как говорится, на носу. Правда, пока совершенно непонятны размеры этого носа.

## 5. МЕДИЦИНА И БИОТЕХНОЛОГИИ

### **МОЖНО ЛИ ВЕРНУТЬ ВКУС МАГАЗИННЫМ ПОМИДОРАМ?**

Современные магазинные помидоры не слишком вкусны. Покупатели называют их «картонными» (и возможно, не без оснований). Часто можно даже услышать мнение, что такими вкусовыми качествами помидоры обязаны генным модификациям. Но это неверно. Сегодня вы не найдете в продаже генно-модифицированных помидоров, и все эти магазинные невкусные помидоры – натуральнее некуда, то есть получены методами традиционной селекции. Между тем все могло бы сложиться по-другому. Наша жизнь была бы немножко вкуснее, если бы общество не сделало свой выбор в пользу «картона».

Основная проблема, возникающая при выращивании томатов, как ни странно, это их созревание. Одновременно с созреванием, покраснением, образованием вкусоароматических веществ начинают происходить процессы, приводящие к порче продукта. Мякоть становится мягкой, томат попросту лопается, теряя товарный вид и создавая питательную среду для плесени и прочих микроорганизмов. Это естественный ход вещей, так

придуманно природой, разнести по времени процессы «созревания» и «порчи» невозможно.

Поэтому сегодня в магазинах мы видим одинаковые «недозрелые» плоды, вкус которых принесен в жертву товарному виду и сроку хранения, а селекционеры, выводя наиболее лежкие сорта, вынужденно уничтожают их вкус. Почему портятся помидоры?

Дело в том, что одновременно с созреванием происходит синтез фермента, который называется полигалактуроназой. Этот фермент разрушает пектин в клеточных стенках помидора, что приводит к размягчению, нарушению формы и всем остальным неприятным последствиям (самому растению это нужно, чтобы рассеять семена).

### **Немного биохимии.**

Таким образом, чтобы сделать помидоры и вкусными, и лежкими, нужно снизить в них концентрацию полигалактуроназы, причем не меняя никаких других свойств. На первый взгляд кажется, что это невозможно. Однако стоит вспомнить, как работает механизм синтеза белка в клетке. Сначала информация о строении белка считывается из ДНК в цепочку матричной РНК, сокращенно мРНК. Затем эта информация в рибосомах транслируется в готовый белок, в нашем случае – в молекулу полигалактонуразы. Теоретически снизить концентрацию фермента в клетках томата можно, вмешавшись в любую стадию в процессе синтеза.

Но это не так уж и просто. В живой клетке одновременно протекает множество процессов, и, чтобы не нарушить жизнедеятельность организма, любое вмешательство должно быть очень аккуратным, точечным и максимально селективным. Мы не можем позволить себе регулировать просто синтез белка, мы должны регулировать синтез совершенно конкретного белка.

Такой способ существует. Для этого в ДНК встраивают новый ген. Но

не простой, а специальный. РНК, считываемая с этого гена, комплементарна исходной, с которой синтезируется полигалактонураза. РНК такого типа часто называют «антисмысловой».

Она способна селективно образовывать комплекс с исходной, комплементарной ей РНК, снижая ее концентрацию. Как следствие, скорость синтеза фермента очень значительно снижается. Манипуляции такого рода селективны и не нарушают хода других процессов в клетке. А значит, позволяют изменить нужные характеристики растения, не влияя на остальные.

### **Содержит ГМО.**

В 1988 году этим методом воспользовалась группа исследователей из Ноттингемского университета (Великобритания). Вместе с учеными британской компании Zeneca Seeds им удалось путем вставки вышеописанного «антисмыслового» гена значительно снизить в томате концентрацию полигалактуроназы и тем самым добиться расширения временного промежутка между моментом созревания и потерей товарного вида. Чуть позднее почти таким же методом (с небольшими отличиями) калифорнийская компания Calgene получила похожий сорт томатов Flavor Savr (произносится как flavor saver, «сохраняющий вкус»).

Этот сорт был разработан в Великобритании, где действуют ограничения на выращивание ГМ-растений, поэтому их производство наладили в США. Но в Объединенное Королевство они все-таки попадали – правда, уже в виде импортного томатного пюре (получить разрешение на продажу переработанных томатов на тот момент создателям не удалось).

Томатная паста под брендами супермаркетов Safeway и Sainsbury's появилась на прилавках в начале 1996 года. Нельзя сказать, что это был фурор. Но это был успех. Потери при сборе урожая и переработке снизились, и новый продукт оказался дешевле традиционной томатной



пасты. Мякоть нового сорта была более богата сухими веществами и пектином, чем традиционные сорта, поэтому пюре получалось на 80% более вязким.

И, разумеется, намного более вкусным. Продажи шли очень активно, во многих магазинах обгоняя показатели «натурального» конкурента. А самое невероятное состояло в том, что на каждой банке на самом видном месте красовалась надпись: «Изготовлено из генетически модифицированных томатов», хотя по законам того времени делать это было вовсе не обязательно. И никого из покупателей такая надпись не отпугивала, а совсем даже наоборот.

### **Фокус обсуждения.**

Ничто не предвещало беды. Но производители нового томатного пюре еще не знали, что известный ученый-генетик профессор Арпад Пуштаи в 1995 году приступил к работе по оценке безопасности одного сорта ГМ-картофеля, в который был вставлен ген, отвечающий за синтез ядовитого лектина в подснежнике. И никто тогда не мог предугадать, что это исследование, а точнее – общественный резонанс вокруг него, надолго закроет дорогу многим хорошим начинаниям.

Проверка на безопасность – стандартная процедура для любого ГМ-растения. Если по каким-то причинам новый ГМО окажется вредным, то это защита от попадания его на рынок и гарантия той степени безопасности, которой не может похвастаться ни один селекционный сорт. Даже если не брать в расчет противоречивость выводов из работы Пуштаи (он две недели кормил ГМ-картошкой с ядовитым лектином зерноядных крыс, в обычный рацион которых картошка не входит, а затем сделал вывод не о вреде картошки для крыс, или лектина, или даже конкретного сорта ГМ-картошки для млекопитающих, а о вреде ГМО вообще), ничего экстраординарного, по сути, не произошло.

Точнее, не произошло бы, если бы фокус обсуждения этой работы не сместился, как это часто бывает, из науки в общество (причем вне зависимости, был ли этот картофель вреден на самом деле). А общество далеко не всегда способно при принятии решений руководствоваться фактами, а не эмоциями. В роли защитников потребителей, к сожалению, чаще всего выступают не самые умные представители человечества и почти всегда – не разбирающиеся даже в базовых принципах того, с чем они борются.

### **Черный пиар.**

Начало 1999 года было ознаменовано в Великобритании (и не только) ежедневными телепередачами и публикациями в СМИ о вреде ГМО (нечто подобное можно наблюдать и в нашей стране). Именно в 1999 году, по данным опросов, спокойно-рассудительное отношение европейцев к ГМО сменилось негативным, вплоть до непримиримого.

Именно тогда, спустя всего лишь три года после столь многообещающего дебюта, вместо того чтобы пойти дальше в Европу и, возможно, добраться до нас, исчезло с прилавков Великобритании первое пюре из ГМ-томатов. Исчезло, чтобы больше никогда не появиться снова. Вместе с пюре пропали вкусные и лежкие помидоры. И вряд ли вернуться. Стоимость процедуры проверки на безопасность, с учетом созданного негативного имиджа ГМО, делает производство такого продукта попросту нерентабельным.

Часто мы слышим, что корпорации в сговоре с государством не дают потребителю выбора, кормят всех нас ГМО и пестицидами. Но на самом деле именно те, кто жалуется на корпорации и сговор, сделали так, что в магазинах не стало вкусных томатов. Кто знает, скольких еще вкусных продуктов мы сегодня лишены их стараниями?

### **Как починить сломанное.**

Многие, наверное, замечали, что «помидоры у бабушки», с характерными зелеными «недозрелостями» в районе плодоножки, оказываются вкуснее, чем равномерно красные магазинные плоды. Но ГМО здесь ни при чем. Просто «бабушкины» помидоры слишком быстро портятся, и поэтому в магазине их не продают. Вы уже знаете, как ученым удалось сделать помидоры нескоропортящимися. А вот «невкусность» современных магазинных томатов обусловлена совсем другими причинами.

Дело в том, что фотосинтез в помидорах регулируют два гена – GLK1 и GLK2. Их функции перекрываются, и поломка любого из них не приводит к серьезным нарушениям в физиологии растения. В листьях работают оба гена. В созревающих плодах – только GLK2. Его активность в районе плодоножки выше, что и приводит к неравномерному созреванию, когда половина плода уже красная, а верхушка еще зеленая.

Но в течение последних 70 лет усилия селекционеров были направлены на выведение «красивых» сортов помидоров, плоды которых окрашиваются равномерно: товарный вид, равномерная «зрелость» важны для массового производства. И однажды в ходе селекции ген GLK2 «сломался». Такие растения жизнеспособны.

Плоды томатов с нерабочим геном стали окрашиваться равномерно, и красивые разновидности с таким признаком быстро захватили прилавки и поля. Но вместе с тем в плодах прекратился фотосинтез, в них стало меньше сахаров и ароматических веществ: помидоры утратили настоящий вкус.

Недавно группа ученых из нескольких университетов – американских (Калифорнийского в Дэвисе, Корнеллского и Мичиганского), испанских (Валенсии и Малаги) и аргентинского Национального университета Ла-Платы – «встроила» в геном томата рабочую версию испорченного когда-

то гена *GLK2* и «запустила» ее. Но не только в области плодоножки, а равномерно по всему плоду. Результаты превзошли все ожидания: новые помидоры оказались вкуснее, а равномерность окраски осталась.

Впрочем, будем честны: мы не уверены, что помидоры действительно оказались вкуснее, так как выводы о вкусе получены не в результате дегустации, а лишь путем химического анализа. Виной тому строгие правила: пробовать на вкус опытные образцы нельзя до тех пор, пока не будет проверена их безопасность. И даже сами разработчики утверждают, что не пробовали их. Сделаем вид, что мы им поверили.

Но весьма показательно, что генная инженерия смогла исправить (и улучшить) то, что однажды испортила селекция. Возможно, когда рассеются созданные нами же необоснованные страхи вокруг генных технологий, покупателям удастся увидеть действительно вкусные плоды в магазинах, а не только на страницах научной периодики.

### **ЗАГЛЯНУТЬ В ЧУЖОЙ СОН**

Возможность контроля над мыслями в том или ином виде широко использовалась авторами многочисленных фантастических романов. Но с недавних пор визуализация мысленных образов перестала относиться к сфере фантастики.

В начале 2000-х годов с помощью фМРТ были предприняты первые попытки «обратной ретинопии» (ретинопия – это упорядоченная проекция сетчатки на зрительной зоне коры головного мозга). Сначала попытки были довольно робкими: испытуемым показывали изображения и одновременно снимали данные об активности различных областей мозга с помощью фМРТ. Набрав необходимую статистику, исследователи пробовали решить обратную задачу – по карте активности мозга угадать, на что смотрит человек.

На простых картинках, где основную роль играла пространственная ориентация, расположение предметов или их категория, все вполне работало, но до «технической телепатии» было еще очень далеко. Но вот в 2008 году ученые из Института нейронаук Калифорнийского университета в Беркли под руководством профессора психологии Джека Гэлланта попытались проделать такой фокус с фотографиями. Они разделили изучаемую область мозга на небольшие элементы – воксели (элементы объемного изображения) – и отслеживали их активность в то время, когда испытуемым (в их роли выступили два автора работы) показывали 1750 различных фотографий.

На основе этих данных ученые построили компьютерную модель, которую «обучили», показав 1000 других фотографий и получив на выходе 1000 различных паттернов активации вокселей. Оказалось, что, показывая эти же 1000 фотографий испытуемым и сравнивая снимаемые с их мозга паттерны с предсказанными компьютером, можно с достаточно высокой точностью (до 82%) определить, на какую именно фотографию смотрит человек.

### **Движущиеся картинки.**

В 2011 году коллектив исследователей под руководством того же профессора Гэлланта из Калифорнийского университета в Беркли добился значительно более интересных результатов. Показывая испытуемым «тренировочные» отрывки из кинофильмов общей продолжительностью 7200 секунд, ученые изучали активность множества вокселей мозга с помощью фМРТ.

Но здесь они столкнулись с серьезной проблемой: фМРТ реагирует на поглощение кислорода тканями мозга – гемодинамику, которая является значительно более медленным процессом, чем изменение нервных сигналов. Для исследования реакции на неподвижные изображения это не

играет особой роли – фотографию можно показывать несколько секунд, а вот с динамичными видеороликами возникают серьезные проблемы. Поэтому ученые создали двухступенчатую модель, которая связывает медленную гемодинамику и быстрые нейронные процессы зрительного восприятия.

Построив первоначальную компьютерную модель «отклика» мозга на различные видео, исследователи обучили ее с помощью 18 млн односекундных видеороликов, случайно выбранных на YouTube. Потом испытуемым показывали «тестовые» фильмы (отличные от «тренировочных»), изучая активность мозга с помощью фМРТ, и компьютер выбирал из этих 18 млн сотню роликов, которые вызывали наиболее близкий паттерн активности, после чего усреднял изображение на этих роликах и выдавал «средний результат». Корреляция (совпадение) между изображением, которое видит человек, и тем, которое сгенерировано компьютером, составила около 30%. Но для первого «чтения мыслей» это очень неплохой результат.

### **Сон в руку.**

Но достижение японских исследователей из Лаборатории нейронаук Института телекоммуникационных исследований в Киото, Института науки и технологии в Наре и Национального института информации и коммуникационных технологий в Киото представляется гораздо более значительным. В мае 2013 года они опубликовали в журнале Science работу «Нейронное декодирование зрительных изображений во время сна». Да, ученые научились видеть сны. Точнее, не видеть, а подсматривать!

Записывая с помощью фМРТ сигналы активности мозга, трех испытуемых будили (около 200 раз) на стадиях неглубокого сна и просили описать содержание последнего сновидения. Из отчетов выделяли

ключевые категории, которые с помощью лексической базы данных WordNet объединяли в группы семантически близких терминов (синсеты), организованные в иерархические структуры. Данные фМРТ (за девять секунд перед пробуждением) отсортировали по синсетам.

Для тренировки модели распознавания бодрствующим испытуемым показывали изображения из базы ImageNet, соответствующие синсетам, и изучали карту активности мозга в зрительной коре. После этого компьютер оказался способным по активности различных областей мозга предсказывать с вероятностью 60–70%, что именно видит человек во сне. Это, кстати, свидетельствует о том, что человек видит сны с помощью тех же областей зрительной коры, которые используются для обычного зрения в бодрствующем состоянии. Вот только почему мы вообще видим сны, ученые пока сказать не могут.

### **ЗАПЧАСТИ ДЛЯ БЕССМЕРТИЯ**

Успехи биологии и медицины в новейшей истории существенно продлили среднюю продолжительность жизни и избавили мир от дамоклова меча многих смертельных болезней. Но не все болезни побеждены, да и жизнь человека, тем более активная, все еще кажется нам слишком короткой. Даст ли наука шанс сделать следующий рывок?

Основания для оптимизма, конечно же, есть. В наши дни в науке наметилось несколько направлений, которые, возможно, позволят в близком или дальнем будущем превратить *Homo sapiens* в более долговечную и надежную мыслящую конструкцию. Первое – это создание электронно-механических «подпорок» для недужного тела. Речь идет о роботизированных бионических протезах конечностей, достоверно воспроизводящих человеческую локомоторику, или даже целых экзоскелетах, которые смогут подарить радость движения

парализованным.

Эти хитроумные изделия дополнит нейромашинный интерфейс, который позволит считывать команды прямо с соответствующих участков головного мозга. Действующие прототипы подобных устройств уже созданы, теперь главное – их совершенствование и постепенное удешевление.

Вторым направлением можно считать исследования генетических и прочих микробиологических процессов, вызывающих старение. Познание этих процессов, возможно, в будущем даст возможность затормозить увядание организма и продлить активную жизнь за вековой предел, а возможно, и далее.

И наконец, к третьему направлению относятся исследования в области создания подлинных запчастей к человеческому телу – тканей и органов, которые структурно и функционально будут мало чем отличаться от природных и позволят своевременно «отремонтировать» организм, пораженный тяжелой болезнью или возрастными изменениями. Известия о новых шагах в этой области приходят сегодня едва ли не ежедневно.

### **Запускаем печать.**

Базовая технология выращивания органов, или тканевой инженерии, заключается в использовании эмбриональных стволовых клеток для получения специализированных клеток той или иной ткани, например гепатоцитов – клеток паренхимы (внутренней среды) печени. Эти клетки затем помещаются внутрь структуры соединительной межклеточной ткани, состоящей преимущественно из белка коллагена.

Таким образом обеспечивается заполнение клетками всего объема выращиваемого органа. Матрицу из коллагена можно получить путем очистки от клеток донорской биологической ткани или, что гораздо проще и удобнее, создать ее искусственным путем из биоразрушаемых полимеров



или специальной керамики, если речь идет о кости. В матрицу помимо клеток вводятся питательные вещества и факторы роста, после чего клетки формируют единый орган или некую «заплатку», призванную заместить собой пораженную часть.

Правда, выращивание искусственной печени, легкого и других жизненно важных органов для пересадки человеку сегодня пока недостижимо, в более простых случаях такая методика успешно применяется. Известен случай пересадки пациентке выращенной трахеи, осуществленной в РНЦ хирургии им. Б.В. Петровского под руководством итальянского профессора П. Маккиарини. В данном случае в качестве основы была взята донорская трахея, которую тщательно очистили от клеток. На их место были введены стволовые клетки, взятые из костного мозга самой пациентки. Туда же были помещены факторы роста и фрагменты слизистой оболочки – их также позаимствовали из поврежденной трахеи женщины, которую предстояло спасти.

Недифференцированные клетки в таких условиях дали начало клетками дыхательного эпителия. Выращенный орган имплантировали пациентке, причем были приняты специальные меры для проращивания имплантата кровеносными сосудами и восстановления кровообращения.

Впрочем, уже существует метод выращивания тканей без применения матриц искусственного или биологического происхождения. Метод нашел воплощение в устройстве, известном как биопринтер. В наши дни биопринтеры «выходят из возраста» опытных образцов, и появляются мелкосерийные модели. Например, аппарат компании Organovo способен распечатать фрагменты тканей, содержащих 20 и более клеточных слоев (причем туда входят клетки разных типов), объединенных межклеточной тканью и сетью кровеносных капилляров.

Соединительная ткань и клетки собираются воедино по той же

технологии, которую используют при трехмерной печати: движущаяся головка, позиционирующаяся с микронной точностью в трехмерной сети координат, «выплевывает» в нужную точку капельки, содержащие либо клетки, либо коллаген и другие вещества. Разные производители биопринтеров сообщили, что их устройства уже способны распечатывать фрагменты кожи подопытных животных, а также элементы почечной ткани. Причем в результате удалось достичь правильного расположения клеток разных типов друг относительно друга. Правда, эпохи, когда принтеры в клиниках будут способны создавать органы разного назначения и больших объемов, придется еще подождать.

### **Мозг под замену.**

Развитие темы запчастей для человека неизбежно приводит нас к теме самого сокровенного – того, что делает человека человеком. Замена мозга – пожалуй, самая фантастическая идея, касающаяся потенциального бессмертия. Проблема, как нетрудно догадаться, в том, что мозг – похоже, самый сложный из известных человечеству материальных объектов во Вселенной. И, возможно, один из самых непонятных. Известно, из чего он состоит, но очень мало известно о том, как он работает.

Таким образом, если мозг удастся воссоздать как совокупность нейронов, устанавливающих друг с другом связи, надо еще придумать, как поместить в него всю необходимую человеку информацию. Иначе в лучшем случае мы получим взрослого человека с «серым веществом» младенца. Несмотря на всю сверхфантастичность конечной цели, наука активно работает над проблемой регенерации нервной ткани. В конце концов, цель может быть и скромнее – например, восстановление части мозга, разрушенной в результате травмы или тяжелого заболевания.

Проблема искусственной регенерации мозговой ткани усугубляется тем, что мозг обладает высокой гетерогенностью: в нем присутствует

множество типов нервных клеток, в частности тормозные и возбуждающие нейроны и нейроглия (буквально – «нервный клей») – совокупность вспомогательных клеток нервной системы. Кроме того, разные типы клеток определенным образом расположены в трехмерном пространстве, и это расположение необходимо воспроизвести.

### **Нервный чип.**

В одной из лабораторий знаменитого Массачусетского технологического института, известного своими разработками в сфере информационных технологий, подошли к созданию искусственной нервной ткани «по-компьютерному», применив элементы технологии изготовления микрочипов.

Исследователи из Бостона взяли смесь нервных клеток, полученных из первичной коры мозга крысы, и нанесли их на тончайшие пластины гидрогеля. Пластины образовали своего рода сэндвич, и теперь задача состояла в том, чтобы вычленив из него отдельные блоки с заданной пространственной структурой. Получив такие прозрачные блоки, ученые намеревались изучать процессы возникновения нервных связей внутри каждого из них.

Задача была решена с помощью фотолитографии. На пластины гидрогеля накладывались пластиковые маски, которые позволяли свету воздействовать лишь на определенные участки, «сваривая» их воедино. Так удалось получить разнообразные по размерам и толщине композиции клеточного материала. Изучение этих «кирпичиков» со временем может привести к созданию значимых фрагментов нервной ткани для использования в имплантах.

Если инженеры MIT подходят к изучению и воссозданию нервной ткани в инженерном стиле, то есть механически формируя нужные структуры, то в Центре биологии развития RIKEN в японском городе Кобе

ученые под руководством профессора Йошики Сасаи нащупывают другой путь – evo-devo, путь эволюции развития. Если плюрипотентные стволовые клетки эмбриона могут при делении создавать самоорганизующиеся структуры специализированных клеток (то есть разнообразные органы и ткани), то нельзя ли, постигнув законы такого развития, направлять работу стволовых клеток для создания имплантатов уже с природными формами?

И вот главный вопрос, на который намеревались найти ответ японские биологи: насколько зависит развитие конкретных клеток от внешних факторов (например, от контакта с соседними тканями), а в какой степени программа «защита» внутри самих стволовых клеток. Исследования показали, что есть возможность вырастить из изолированной группы стволовых клеток заданный специализированный элемент организма, хотя внешние факторы играют определенную роль – например, необходимы определенные химические индуцирующие сигналы, заставляющие стволовые клетки развиваться, скажем, именно как нервная ткань. И для этого не понадобится никаких поддерживающих структур, которые придется наполнять клетками – формы возникнут сами в процессе развития, в ходе деления клеток.

По запатентованной Сасаи методике японцам удалось вырастить трехмерные структуры нервной ткани, первой из которых стала полученная из эмбриональных стволовых клеток мышей сетчатка глаза (так называемый зрительный бокал), которая состояла из функционально различных типов клеток. Они были расположены так, как предписывает природа. Следующим достижением стал аденогипофиз, не просто повторяющий структуру природного, но и выделяющий при пересадке мышце необходимые гормоны.

Разумеется, до полнофункциональных имплантов нервной ткани, а тем

более участков человеческого мозга еще очень и очень далеко. Однако успехи искусственной регенерации тканей с применением технологий эволюции развития указывают путь, по которому пойдет вся регенеративная медицина: от «умных» протезов – к композитным имплантатам, в которых готовые пространственные структуры «проращиваются» клеточным материалом, и далее – к выращиванию запасных частей для человека по тем же законам, по которым они развиваются в естественных условиях.

### **РОБОТ – ХИРУРГ**

Тысячи роботов по всему миру всегда готовы к хирургическим операциям любой сложности. Добро пожаловать на операционный стол к хирургу, чьи движения идеально точны, а пальцы не знают дрожи!

7 сентября 2001 года доктор Мишель Ганье, руководитель отделения лапароскопической хирургии Нью-Йоркского госпиталя Mount Sinai, закончил 55-минутную операцию и встал со своего места, чтобы размяться. Операция прошла без осложнений, и женщину с удаленным желчным пузырем вскоре доставили в палату. Хирурга и пациентку, находящуюся в Университете Луи Пастера в Страсбурге, в этот момент разделяли 7000 км Атлантического океана, а сама операция была проведена с помощью роботизированной системы da Vinci, управляемой по выделенному оптоволоконному каналу.

По словам доктора Ганье, самой сложной частью этой операции было обеспечение минимальной задержки в канале связи – усилиями команды компьютерщиков под руководством Стива Бетнера из Калифорнийского университета ее удалось снизить с 400 до 66 мс. Мишель Ганье тогда оптимистично высказал предположение, что в будущем врачи смогут проводить подобные операции пациентам в удаленных районах. Однако

недостаточная надежность систем связи пока сдерживает реализацию этого прогноза. Обойти проблему можно, если наделить роботов-хирургов некоторой самостоятельностью. Об этом уже давно мечтают фантасты.

Айзек Азимов еще в 1982 году в романе «Двухсотлетний человек» писал: «Эндрю Мартин разглядывал правую руку робота, его оперирующую руку, которая неподвижно лежала на столе. Пальцы были длинными и обладали изящными металлическими формами, грациозные изгибы которых позволяли легко представить, как скальпель становится с ними единым целым. В работе хирурга не будет ни сомнений, ни колебаний, ни дрожи в руках, ни ошибок».

Он оказался провидцем. Хотя, конечно, не во всем. Да, «руки» хирургической системы da Vinci Si составляют с инструментами единое целое и совершенно не дрожат. Вот только этот робот совсем не похож на человека, а напоминает огромного паука, запустившего лапы в пациента на операционном столе. Проворные манипуляторы хозяйничают внутри человеческого тела с точностью и уверенностью, недоступными человеческим рукам.

### **Со стороны врача.**

Разумеется, da Vinci оперирует не по своему собственному произволу. Им командует хирург, который сидит за консолью в углу операционной, глядя в окуляры стереоэндоскопа высокого разрешения. Манипуляторы робота, находящегося в нескольких метрах от консоли, повторяют каждое движение хирурга. И это не какой-нибудь прототип, а вполне массовая хирургическая система, выпущенная тиражом более 2500 штук, которая выполняет более 200 000 операций в год по всему миру.

Система da Vinci, поступившая в больницы 14 лет назад, сегодня является самым распространенным хирургическим роботом в мире. И самым универсальным: началось все с урологической хирургии, но сейчас

с помощью этого робота выполняют множество самых разных операций, его манипуляторы способны дотянуться почти до любого внутреннего органа.

Конечно, применение роботов изменило привычный порядок в операционных.

«Роботоассистированные операции – это дальнейшее развитие минимально инвазивной (то есть с минимальным вмешательством) хирургии. Они значительно меняют характер операции как в плане работы врача, так и в плане безопасности пациента, – говорит Станислав Берелавичус, хирург и старший научный сотрудник Института хирургии им. А.В. Вишневского. – Скажем, хирург теперь не стоит на протяжении всей операции – а она может длиться несколько часов – рядом с операционным столом, а сидит за консолью управления в нестерильной зоне, глядя в окуляры стереоэндоскопа. Казалось бы, мелочь, но ведь чем удобнее работать врачу, тем более точны его движения, а значит, менее травматична операция».

Как говорит Эндрю Вагнер, директор отделения минимально инвазивной урологической хирургии в Медицинском центре Beth Israel Deaconess в Бостоне, «как минимум пару раз в месяц тот или иной пациент просит меня показать руки. Люди озабочены вопросом, не дрожат ли у меня пальцы. Я показываю, стесняться мне нечего. Но теперь такие вещи не имеют никакого значения: когда робот масштабирует движения моих рук, он полностью сглаживает случайные вибрации».

### **Не бойтесь роботов.**

По словам Вагнера (а его мнение разделяет все большее число хирургов, которым довелось видеть da Vinci в действии), преимущество роботизированной хирургии состоит в том, что в ней соединяются человеческий разум, опыт хирурга и безупречная точность механизма.

Манипуляторы с инструментами вводятся через совсем небольшие надрезы, при этом врач может орудовать ими более ловко, чем инструментами, используемыми в лапароскопии (метод хирургии, в котором операции на внутренних органах проводят через небольшие, 0,5–1,5 см, разрезы). При этом пациент травмируется значительно меньше (не говоря уже о сравнении с традиционной открытой хирургией). Соответственно, снижается вероятность осложнений и сокращается время, необходимое на реабилитацию.

По словам Станислава Берелавичуса, при робоассистированных абдоминальных (в брюшной полости) операциях кровопотеря примерно на порядок ниже, чем при лапароскопических. При простатэктомии (удалении простаты) открытым способом пациент после операции должен несколько дней оставаться в больнице. Если же операцию выполняет робот, это время можно сократить до одного дня. «Раньше все операции на простате и почках проводились открытым или лапароскопическим способом, а сейчас 90% из них выполняется с помощью робота», – говорит Вагнер.

Пациентов обычно радует перспектива операции, выполняемой роботом, хотя некоторые склонны при этом известии впадать в панику. «Само упоминание о роботе многих вводит в заблуждение. Люди думают, что я просто нажму какую-то кнопку и выйду из операционной», – посмеивается Вагнер. «Робот в данном случае представляет собой набор очень совершенных инструментов, значительно расширяющих возможности врача, – говорит Станислав Берелавичус. – Но оперирует все равно хирург».

### **Свобода воли.**

Между тем планы по наделению медицинских роботов некоторой автономностью – далеко не фантастика. Восемь лет назад израильская компания Mazor Robotics, разработчик хирургического робота Renaissance,



столкнулась с совершенно неожиданной проблемой. Недостаточная эффективность? Совсем наоборот. Робот умел наводить хирургическое сверло в определенные точки, заранее выбранные в позвоночном столбе пациента, и самостоятельно высверливать отверстия на заданную глубину, а от хирурга требовалось только подтвердить правильный выбор цели.

Однако в процессе предварительных испытаний выяснилось, что, хотя хирургов-ортопедов полностью устраивала высокая точность робота, им совершенно не нравилось отсутствие обратной связи при сверлении – им нужно было ощущать, как сверло вгрызается в кость. Ори Хадоми, директор компании Mazor, говорит, что компания была вынуждена «подрезать крылышки» своему детищу и отключить автоматический режим сверления.

Renaissance – относительно новая, но далеко не единственная полуавтономная медицинская хирургическая система. Среди роботов, используемых в современной медицине, можно отметить многочисленные установки для лазерной коррекции зрения типа LASIK, и RIO компании Mako Surgical для пластики рабочих поверхностей суставов, и систему для лучевой терапии CyberKnife. Это вполне полноценные роботы, то есть машины, послушно выполняющие поставленную перед ними задачу по заранее определенной программе, которую, впрочем, можно корректировать в зависимости от различных внешних факторов.

К примеру, CyberKnife – это не просто манипулятор с линейным ускорителем электронов для генерации рентгеновского излучения, обученный точному прицеливанию. Его алгоритмы позволяют вести стрельбу по движущейся цели, то есть подстраивать фокусировку, отслеживая дыхание и другие произвольные движения пациента. Благодаря этому на пациента можно воздействовать более узким пучком рентгена, сократив при этом общее число сеансов. Поскольку аппарат

способен очень точно облучать именно опухоль, не затрагивая соседние ткани, удастся не только существенно снизить вероятность различных побочных эффектов, но и дать надежду многим пациентам, которые раньше считались неоперабельными.

### **Вторая волна.**

Спрос на хирургические системы растет, и ученые создают медицинских роботов второй волны, обладающих еще большей степенью автономности. В 2010 году группа разработчиков ультразвуковых излучателей в Университете Дьюка продемонстрировала своего робота, который был предназначен для биопсии. Первыми «испытуемыми» системы стали индюшачьи грудки, а затем ее успешно испытали на двух пациентках, которым был диагностирован рак груди.

Стивен Смит, руководитель группы, полагает, что разработанная под его началом методика должна оказаться значительным подспорьем в развивающихся странах. «Легко себе представить мобильный фургон, в котором смонтирован аппарат для маммографии, трехмерный сканер, наш робот и компьютер с соответствующим программным пакетом, – говорит Смит. – При такой постановке дела со всей работой будет управляться всего один лаборант».

В Университете Карнеги–Меллон профессор робототехники и один из основателей компании Medrobotics Хауи Чозет ждет разрешения FDA (Управление по контролю за качеством пищевых продуктов и лекарств), которое должно одобрить первую коммерческую модификацию его системы Flex. Змееподобный хирургический робот будет предназначен для выполнения отоларингологических операций.

Впрочем, Чозет не намерен ограничиваться этой областью и надеется разработать аналогичные системы, способные не только конкурировать с da Vinci, но и двинуться дальше, меняя наши представления о том, на что

способна хирургия и кому она должна быть доверена. «Медицинская помощь должна стать несравненно более доступной, – говорит Чозет. – Испытывая наших змееподобных роботов на свиньях, мы проводили хирургические операции руками людей, не имеющих подобной квалификации».

Оператор управляет этой системой с помощью всего лишь одного джойстика. При таком подходе от оператора требуются всего лишь приблизительные познания об анатомии человека, чтобы просто-напросто не заблудиться в его внутренностях. Операционные надрезы станут существенно меньше, и производить их можно будет в тех участках тела, где они будут быстрее заживать.

Чозет полагает, что такая операционная система очень пригодилась бы на поле боя, где полевой санитар, вооруженный такой вот просто управляемой змейкой, мог бы значительно уменьшить количество летальных исходов. «Для того чтобы освоить управление аппаратом da Vinci, нужно медицинское образование и достаточная хирургическая практика, – говорит Чозет. – А на изучение анатомии и на то, чтобы освоить управление гибкой змейкой, потребуется на порядок меньше времени. Если вы играете в видеоигры, вам будет по силам и управлять нашим роботом-хирургом».

### **Робот + человек.**

Впрочем, врачи, оперирующие с помощью системы da Vinci, весьма скептически относятся к подобным заявлениям. «Посадите человека без медицинского образования за консоль da Vinci – ну и что он будет делать? – спрашивает Станислав Берелавичус. – Более того, поскольку тактика роботоассистированных операций похожа на лапароскопическую, управлять системой должен не просто хирург, а врач, имеющий опыт подобных операций». В операционной нет места для непрофессионалов,

причем речь идет не только о хирурге, но и обо всей операционной бригаде.

«Каждый пациент по-своему уникален, – говорит Кэтрин Мор, руководитель медицинских исследований Intuitive Surgical, компании-производителя системы da Vinci. В теории можно себе представить автономный вариант da Vinci, который был бы наделен способностью выявить и удалить пораженную простату, используя подробную карту внутренних органов. В половине случаев результат будет вполне приличным, но вот в другой половине... Нервы или сосуды, скажем, могут оказаться не совсем там, где обычно, – и это грозит серьезными проблемами.

Во многом это упирается в проблему адекватного отображения. Легче сканировать твердые ткани, например кости. А вот мягкие ткани, пронизанные во всех направлениях сосудами и нервами, – всегда головоломка. Если системы типа Renaissance, позиционирующие при операции на позвоночнике сверло с субмиллиметровой точностью, или RIO, фрезерующий поверхность поврежденного сустава, могут действовать по заранее заданной программе, которая строится в соответствии с рентгенограммами, томографией и ультразвуковыми обследованиями и потом в ходе операции лишь подтверждается, то в области мягких тканей навигация представляет собой серьезную проблему».

Так что развитие хирургических роботов явно не пойдет по прямому пути наделения их все большей автономностью. Автоматика и телемеханика – это просто две составляющие части общего робототехнического решения, а дальнейшие шаги в развитии искусственного интеллекта всегда будут подстраховываться человеческим разумом. Но всем ясно, что эпоха, когда врач ковыряется в чужом теле

собственными руками, несомненно, подходит к концу.

### ФАГИ НА СМЕНУ АНТИБИОТИКАМ

У всех существ, обитающих на земле, есть микроскопические паразиты – вирусы. Есть свои вирусы и у бактерий. Цикл размножения бактериальных вирусов неизбежно заканчивается гибелью микроба. Чтобы подчеркнуть такую особенность, один из первооткрывателей этого эффекта, Феликс Д’Эрель, придумал специальное название – «бактериофаги», в переводе с греческого – «пожиратели бактерий».

В конце XX века стало ясно, что бактерии безусловно доминируют в биосфере Земли, составляя более 90% ее биомассы. У каждого вида имеется множество специализированных типов вирусов. По предварительным оценкам, число видов бактериофагов составляет около 10<sup>15</sup>. Чтобы понять масштаб этой цифры, можно сказать, что если каждый человек на Земле будет каждый день открывать по одному новому бактериофагу, то на описание всех их понадобится 30 лет.

Таким образом, бактериофаги – самые малоизученные существа в нашей биосфере. Большинство известных сегодня бактериофагов принадлежит отряду Caudovirales – хвостатые вирусы. Их частицы имеют размер от 50 до 200 нм. Хвост разной длины и формы обеспечивает присоединение вируса к поверхности бактерии-хозяина, головка (капсид) служит хранилищем для генома. Геномная ДНК кодирует структурные белки, формирующие «тело» бактериофага, и белки, которые обеспечивают размножение фага внутри клетки в процессе инфекции.

Можно сказать, что бактериофаг – это природный высокотехнологичный нанообъект. Например, хвосты фагов представляют собой «молекулярный шприц», который протыкает стенку бактерии и

сокращаясь, впрыскивает свою ДНК внутрь клетки. С этого момента начинается инфекционный цикл. Его дальнейшие этапы состоят из переключения механизмов жизнедеятельности бактерии на обслуживание бактериофага, размножение его генома, построение множества копий вирусных оболочек, упаковки в них ДНК вируса и, наконец, разрушение (лизис) хозяйской клетки.

У каждого этапа существует множество нюансов, имеющих глубокий эволюционный и экологический смысл. Ведь бактерии и их вирусные паразиты сосуществуют сотни миллионов, если не миллиарды лет. И эта борьба за выживание не закончилась ни тотальным уничтожением одноклеточных, ни приобретением тотальной устойчивости к фагам и бесконтрольным размножением бактерий.

Помимо постоянного эволюционного соревнования механизмов защиты у бактерий и нападения у вирусов, причиной сложившегося равновесия можно считать и то, что бактериофаги специализировались по своему инфекционному действию. Если имеется крупная колония бактерий, где своих жертв найдут и следующие поколения фагов, то уничтожение бактерий литическими (убивающими, дословно – растворяющими) фагами идет быстро и непрерывно.

Если потенциальных жертв маловато или внешние условия не слишком подходят для эффективного размножения фагов, то преимущество получают фаги с лизогенным циклом развития. В этом случае после внедрения внутрь бактерии ДНК фага не сразу запускает механизм инфекции, а до поры до времени существует внутри клетки в пассивном состоянии, зачастую внедряясь в бактериальный геном.

В таком состоянии профага вирус может существовать долго, проходя вместе с хромосомой бактерии циклы деления клетки. И лишь когда бактерия попадает в благоприятную для размножения среду, активируется

литический цикл инфекции. При этом, когда ДНК фага освобождается из бактериальной хромосомы, часто захватываются и соседние участки бактериального генома, а их содержимое в дальнейшем может перенестись в следующую бактерию, которую заразит бактериофаг. Этот процесс (трансдукция генов) считается важнейшим средством переноса информации между прокариотами – организмами без клеточных ядер.

Все эти молекулярные тонкости не были известны во втором десятилетии XX века, когда были открыты «невидимые инфекционные агенты, уничтожающие бактерии». Но и без электронного микроскопа, с помощью которого в конце 1940-х впервые удалось получить изображения бактериофагов, было понятно, что они способны уничтожать бактерии, в том числе и болезнетворные. Это свойство было незамедлительно востребовано медициной.

Первые попытки лечения фагами дизентерии, раневых инфекций, холеры, тифа и даже чумы были проведены достаточно аккуратно, и успех выглядел вполне убедительно. Но после начала массового выпуска и использования фаговых препаратов эйфория сменилась разочарованием. О том, что такое бактериофаги, как производить, очищать и применять их лекарственные формы, было известно еще очень мало. Достаточно сказать, что по результатам предпринятой в США в конце 1920-х годов проверки во многих промышленных фагопрепаратах собственно бактериофагов вообще не оказалось.

### **Проблема с антибиотиками.**

Вторую половину XX века в медицине можно назвать «эрой антибиотиков». Однако еще первооткрыватель пенициллина Александр Флеминг в своей нобелевской лекции предупреждал, что устойчивость микробов к пенициллину возникает довольно быстро. До поры до времени антибиотикоустойчивость компенсировалась разработкой новых типов

противомикробных лекарств. Но с 1990-х годов стало ясно, что человечество проигрывает «гонку вооружений» против микробов.

Виновато прежде всего бесконтрольное применение антибиотиков не только в лечебных, но и в профилактических целях, причем не только в медицине, но и в сельском хозяйстве, пищевой промышленности и быту. В результате устойчивость к этим препаратам начала вырабатываться не только у болезнетворных бактерий, но и у самых обычных микроорганизмов, живущих в почве и воде, делая из них «условных патогенов».

Такие бактерии комфортно существуют в медицинских учреждениях, заселяя сантехнику, мебель, медицинскую аппаратуру, порой даже дезинфицирующие растворы. У людей с ослабленным иммунитетом, каких в больницах большинство, они вызывают тяжелейшие осложнения.

Неудивительно, что медицинское сообщество бьет тревогу. В прошедшем, 2012 году гендиректор ВОЗ Маргарет Чен выступила с заявлением, предсказывающим конец эры антибиотиков и беззащитность человечества перед инфекционными заболеваниями. Впрочем, практические возможности комбинаторной химии – основы фармакологической науки – далеко не исчерпаны. Другое дело, что разработка противомикробных средств – очень дорогой процесс, не приносящий таких прибылей, как многие другие лекарства. Так что страшилки о «супербактериях» – это скорее предостережение, побуждающее людей к поискам альтернативных решений.

### **На медицинской службе.**

Вполне логичным выглядит возрождение интереса к использованию бактериофагов – естественных врагов бактерий – для лечения инфекций. Действительно, за десятилетия «эры антибиотиков» бактериофаги активно служили науке, но не медицине, а фундаментальной молекулярной



биологии. Достаточно упомянуть расшифровку «триплетов» генетического кода и процесса рекомбинации ДНК. Сейчас о бактериофагах известно достаточно, чтобы обоснованно выбирать фаги, подходящие для терапевтических целей.

Достоинств у бактериофагов как потенциальных лекарств множество. Прежде всего – это их несметное количество. Хотя изменять генетический аппарат бактериофага тоже намного проще, чем у бактерии, и тем более – у высших организмов, в этом нет необходимости. Всегда можно подобрать что-то подходящее в природе. Речь идет скорее о селекции, закреплении востребованных свойств и размножении нужных бактериофагов.

Это можно сравнить с выведением пород собак – ездовых, сторожевых, охотничьих, гончих, бойцовых, декоративных... Все они при этом остаются собаками, но оптимизированы под определенный вид действий, нужных человеку. Во-вторых, бактериофаги строго специфичны, то есть они уничтожают только определенный вид микробов, не угнетая при этом нормальную микрофлору человека.

В-третьих, когда бактериофаг находит бактерию, которую должен уничтожить, он в процессе своего жизненного цикла начинает размножаться. Таким образом, не столь острым становится вопрос дозировки. В-четвертых, бактериофаги не вызывают побочных эффектов. Все случаи аллергических реакций при использовании терапевтических бактериофагов были вызваны либо примесями, от которых препарат был недостаточно очищен, либо токсинами, выделяющимися при массовой гибели бактерий. Последнее явление, «эффект Герксхаймера», нередко наблюдается и при применении антибиотиков.

### **Две стороны медали.**

К сожалению, недостатков у медицинских бактериофагов тоже немало. Самая главная проблема проистекает из достоинства – высокой

специфичности фагов. Каждый бактериофаг инфицирует строго определенный тип бактерий, даже не таксономический вид, а ряд более узких разновидностей, штаммов. Условно говоря, как если бы сторожевая собака начинала лаять только на одетых в черные плащи громил двухметрового роста, а на лезущего в дом подростка в шортах никак не реагировала.

Поэтому для нынешних фаговых препаратов нередки случаи неэффективного применения. Препарат, сделанный против определенного набора штаммов и прекрасно лечащий стрептококковую ангину в Смоленске, может оказаться бессильным против по всем признакам такой же ангины в Кемерове. Болезнь та же, вызывается тем же микробом, а штаммы стрептококка в разных регионах оказываются различными.

Для максимально эффективного применения бактериофага необходима точная диагностика патогенного микроба, вплоть до штамма. Самый распространенный сейчас метод диагностики – культуральный посев – занимает много времени и требуемой точности не дает. Быстрые методы – типирование с помощью полимеразной цепной реакции или масс-спектрометрии – внедряются медленно из-за дороговизны аппаратуры и более высоких требований к квалификации лаборантов. В идеале подбор фагов-компонентов лекарственного препарата можно было бы делать против инфекции каждого конкретного пациента, но это дорого и на практике неприемлемо.

Другой важный недостаток фагов – их биологическая природа. Кроме того, что бактериофаги для поддержания инфекционности требуют особых условий хранения и транспортировки, такой метод лечения открывает простор для множества спекуляций на тему «посторонней ДНК в человеке». И хотя известно, что бактериофаг в принципе не может заразить человеческую клетку и внедрить в нее свою ДНК, поменять общественное

мнение непросто.

Из биологической природы и довольно большого, по сравнению с низкомолекулярными лекарствами (теми же антибиотиками), размера вытекает третье ограничение – проблема доставки бактериофага в организм. Если микробная инфекция развивается там, куда бактериофаг можно приложить напрямую в виде капель, спрея или клизмы, – на коже, открытых ранах, ожогах, слизистых оболочках носоглотки, ушей, глаз, толстого кишечника – то проблем не возникает.

Но если заражение происходит во внутренних органах, ситуация сложнее. Случаи успешного излечения инфекций почек или селезенки при обычном пероральном приеме препарата бактериофага известны. Но сам механизм проникновения относительно крупных (100 нм) фаговых частиц из желудка в кровоток и во внутренние органы изучен плохо и сильно разнится от пациента к пациенту. Бактериофаги бессильны и против тех микробов, которые развиваются внутри клеток, например возбудителей туберкулеза и проказы. Через стенку человеческой клетки бактериофаг пробраться не может.

Нужно отметить, что противопоставлять применение бактериофагов и антибиотиков в медицинских целях не следует. При совместном их действии наблюдается взаимное усиление противобактериального эффекта. Это позволяет, например, снизить дозы антибиотиков до значений, не вызывающих выраженных побочных эффектов. Соответственно, и механизм выработки у бактерий устойчивости к обоим компонентам комбинированного лекарства почти невозможен.

Расширение арсенала противомикробных препаратов дает больше степеней свободы в выборе методики лечения. Таким образом, научно обоснованное развитие концепции применения бактериофагов в противомикробной терапии – перспективное направление. Бактериофаги

служат не столько альтернативой, сколько дополнением и усилением в борьбе с инфекциями.

## 6. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

### **ВВЕДЕНИЕ.**

Сверхпроводимость - физическое явление, наблюдаемое у некоторых веществ (сверхпроводников), при охлаждении их ниже определенной критической температуры  $T_c$ , и состоящее в обращении в нуль электрического сопротивления постоянному току и выталкивания магнитного поля из объема образца ( эффект Мейснера). Явление открыто в 1911 г. Х. Каммерлинг-Оннесом. Изучая температурный ход электросопротивления Hg, он обнаружил, что при температуре ниже 4,22К Hg практически теряет сопротивление.

### **Теория сверхпроводимости.**

Далее оказалось, что при крайне низких температурах целый ряд веществ обладает сопротивлением по крайней мере в 10-12 раз меньше, чем при комнатной температуре. Эксперименты показывают, что если создать ток в замкнутом контуре из сверхпроводников, то этот ток продолжает циркулировать и без источника ЭДС. Токи Фуко в сверхпроводниках сохраняются очень долгое время и не затухают из-за отсутствия джоулева тепла (токи до 300А продолжают течь много часов подряд). Изучение прохождения тока через ряд различных проводников показало, что сопротивление контактов между сверхпроводниками также равно нулю. Отличительным свойством сверхпроводимости является отсутствие явления Холла. В то время, как в обычных проводниках под влиянием магнитного поля ток в металле смещается, в сверхпроводниках

это явление отсутствует. Ток в сверхпроводнике как бы закреплен на своем месте.

Сверхпроводимость исчезает под действием следующих факторов:

- 1) повышение температуры;
- 2) действие достаточно сильного магнитного поля;
- 3) достаточно большая плотность тока в образце;

С повышением температуры до некоторой  $T_c$  почти внезапно появляется заметное омическое сопротивление. Переход от сверхпроводимости к проводимости тем круче и заметнее, чем однороднее образец ( наиболее крутой переход наблюдается в монокристаллах).

Переход от сверхпроводящего состояния в нормальное можно осуществить путем повышения магнитного поля при температуре ниже критической  $T_c$ . Минимальное поле  $B_c$ , в котором разрушается сверхпроводимость называется критическим магнитным полем. Зависимость критического поля от температуры описывается эмпирической формулой.

$$B_c = B_0 [ 1 - (T/T_c)^2 ],$$

где  $B_0$  - критическое поле, экстраполированное к абсолютному нулю температуры.

Для некоторых веществ повидимому имеет место зависимость от  $T$  в первой степени. При действии магнитного поля на сверхпроводник наблюдается особого вида гистерезис, а именно если повышая магнитное поле уничтожить сверхпроводимость при  $H=H_t$  (  $H$  - сила поля,  $H_t$  - повышенная сила поля:  $H_t = a (T_c^2 - T^2)$  ), то с понижением интенсивности поля сверхпроводимость появится вновь при поле  $H_{t'} < H_t$ ,  $dH = H_t - H_{t'}$  меняется от образца к образцу и обычно составляет 10%  $H_t$ . Повышение силы тока также приводит к исчезновению сверхпроводимости, то есть при этом понижается  $T_c$ . Чем ниже температура, тем выше та предельная сила

тока  $i_c$  при которой сверхпроводимость уступает место обычной проводимости.

Сверхпроводимость наблюдается как у элементов, так и у сплавов и металлических соединений. Сверхпроводимость есть у Hg, Sn(белое), Pb, Tl, Tn, Ga, Ta, Th, Ti, Nb (иногда Cd).

### **Идеальный проводник и сверхпроводник. Эффект Мейснера.**

Для анализа поведения идеального проводника в магнитном поле рассмотрим контур, помещенный в поле с индукцией  $B_a$ . Если площадь, ограниченная кольцом равна  $A$ , то поток, пронизывающий кольцо, можно описать по формуле

$$\Phi = A \cdot B_a.$$

При изменении приложенного поля в кольце, согласно закону Ленца, индуцируются токи. Они направлены так, что созданный ими внутри кольца поток стремится компенсировать изменение потока, вызванное переменной приложенного поля. Между индуцированным током и электродвижущей силой ( $-A \cdot \frac{dB_a}{dt}$ ) справедливо следующее соотношение:

$$-A \cdot \frac{dB_a}{dt} = R_i + L \cdot \frac{di}{dt},$$

где  $R$  и  $L$  - полное сопротивление и индуктивность контура.

В обычном кольце наведенные токи из-за конечного сопротивления быстро затухают и поток, пронизывающий контур принимает новое значение. В случае идеальной проводимости  $R=0$ , последнее соотношение принимает вид

$$-A \cdot \frac{dB_a}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt}$$

или

$$Li + AB_a = const.$$

Таким образом, полный магнитный поток через контур без сопротивления ( $Li + AB_a$ ) не может измениться. Даже при снижении внешнего поля до нуля, внутренний поток сохраняется благодаря

циркулирующему в замкнутом кольце индуцированного незатухающего тока.

Все вышеизложенное относилось к условию, при котором кольцо, находясь в приложенном магнитном поле, охлаждалось ниже температуры  $T_c$ , при которой исчезало сопротивление. Если же контур сначала охладить, а затем приложить внешнее поле, то результирующий внутренний поток останется равным нулю несмотря на наличие внешнего поля.

Рассмотрим поведение идеального проводника в магнитном поле. Предположим, что образец из идеального проводника проходит следующие стадии: сначала охлаждается ниже некоторой температуры, когда падает сопротивление, а затем накладывается магнитное поле. Сопротивление по любому произвольно выбранному замкнутому контуру внутри металла равно нулю. Следовательно, величина магнитного потока, заключенного внутри этого кольца, остается равной нулю. Произвольность выбора контура позволяет заключить, что магнитный поток равен нулю по всему объему образца. Это связано с индуцированными магнитным полем незатухающими токами по поверхности образца. Они создают магнитный поток, плотность которого  $B_i$  повсюду внутри металла точно равна по величине и противоположна по плотности потока приложенного магнитного поля  $B_a$ . Таким образом, возникает ситуация, когда поверхностные токи, часто называемые экранирующими, препятствуют проникновению в образец магнитного потока приложенного поля. Если внутри вещества, находящегося во внешнем поле, магнитный поток равен нулю, то говорят, что он проявляет идеальный диамагнетизм. При снижении плотности приложенного поля до нуля образец остается в своем немагнитном состоянии.

В другом случае, когда магнитное поле приложено к образцу, находящемуся выше переходной температуры, конечная картина заметно изменится. Для большинства металлов (кроме ферромагнетиков) значение относительной магнитной проницаемости близко к единице. Поэтому плотность магнитного потока внутри образца практически равна плотности потока приложенного поля. Исчезновение электросопротивления после охлаждения не оказывает влияния на намагниченность, и распределение магнитного потока не меняется. Если теперь снизить приложенное поле до нуля, то плотность магнитного потока внутри сверхпроводника не может меняться, на поверхности образца возникают незатухающие токи, поддерживающие внутри магнитный поток. В результате образец остается все время намагниченным. Таким образом, намагниченность идеального проводника зависит от последовательности изменения внешних условий.

В течение почти четверти века считали, что единственным характеристическим свойством сверхпроводящего состояния является отсутствие электрического сопротивления. Это означает, что сверхпроводник в магнитном поле будет вести себя так, как описано выше. Однако такой подход приводит к неоднозначному описанию сверхпроводящей фазы.

Эксперимент, иллюстрирующий переход из сверхпроводящего состояния в обычное продемонстрировал, что сверхпроводники - нечто большее, чем идеальные проводники. Они обладают дополнительным свойством, отсутствующим от металла, просто лишенного сопротивления: металл в сверхпроводящем состоянии никогда не позволяет магнитному потоку проникнуть внутрь, всегда  $B_i=0$ .

Когда сверхпроводник охлаждается в слабом магнитном поле, то при температуре перехода на его поверхности возникает незатухающий ток,



циркуляция которого обращает внутренний магнитный поток в нуль. Это явление, заключающееся в том, что внутри сверхпроводника плотность магнитного потока всегда, даже во внешнем магнитном поле, равна нулю, называется эффектом Мейснера.

Эффект выталкивания магнитного поля из сверхпроводника можно пояснить на основе представлений о намагниченности. Если экранирующие токи, полностью компенсирующие внешнее магнитное поле, сообщают образцу магнитный момент  $m$ , то намагниченность  $M$  выражается соотношением

$$M=m/V,$$

где  $V$  - объем образца. Можно говорить о том, что экранирующие токи приводят к появлению намагниченности, соответствующей намагниченности идеального ферромагнетика с магнитной восприимчивостью, равной минус единице.

### **Эффекты Джозефсона.**

Если два сверхпроводника разделены между собой достаточно тонким слоем диэлектрика (например, два металлических слоя, разделенных окислом), то проникновение через барьер макроскопических волновых функций приводит к их перекрытию или к тунелированию электронных пар. Связанные с этим эффекты были количественно исследованы Брайаном Джозефсоном в 1962г.. Он показал, что если имеется разность фаз между этими двумя волновыми функциями, то ток может протекать в отсутствие какой-либо разности потенциалов.

Слой диэлектрика - не единственно возможный тип “слабого звена”, среди других типов можно отметить точечный контакт двух хорошо шлифованных сверхпроводников, или же микромостик, образованный путем травления сверхпроводящей пленки. На практике при нулевом напряжении через контакт можно пропустить ток только вплоть до

некоторого порогового значения, выше которого появится напряжение. Это напряжение затем возрастает при росте тока. Такое явление называется стационарным эффектом Джозефсона. Нестационарный эффект Джозефсона возникает, когда к контакту прикладывается напряжение и через него начинает течь переменный ток.

Эффект Джозефсона может иметь много приложений, но он может быть и паразитным. Он возникает на границах зерен в поликристаллических образцах новых сверхпроводников и препятствует, например, попыткам измерения лондонской глубины проникновения.

### **Сверхпроводники первого рода.**

Проанализируем протекание тока по проволоке круглого сечения, находящейся в сверхпроводящем состоянии. В отличие от экранирующего тока, возникающего при наложении магнитного поля, ток от внешнего источника будем называть транспортным. Если бы этот ток протекал внутри сверхпроводника, он создавал бы в его объеме магнитное поле, что противоречит эффекту Мейснера. Следовательно, ток, протекающий должен быть ограничен тонким слоем около поверхности, в который проникает магнитное поле. Толщина этого поверхностного слоя равна глубине проникновения  $\lambda$ .

Протекающий по сверхпроводнику транспортный ток будет создавать магнитное поле. Между плотностью тока и магнитным полем существует строгая связь, которая означает, что критическому полю соответствует определенная критическая плотность тока (правило Сильсби). Причем совершенно безразлично, о каком токе идет речь - транспортном, или экранирующем. Для проволоки круглого сечения магнитное поле на поверхности  $B_0$  и суммарный ток  $I$  связаны отношением

$$B_0 = \mu_0 I / (2\pi R),$$

где  $R$  - радиус проволоки.

Из данного уравнения следует, что критический ток имеет такую же зависимость от температуры, как и критическое магнитное поле. Расчет показывает, что, например, для оловянной проволоки радиусом 0,5 мм критическая сила тока при  $T=0$  К составляет 75 А.

С помощью правила Сильсби можно определить также критические токи для сверхпроводников во внешнем магнитном поле. Для этого необходимо сложить внешнее магнитное поле с полем транспортного тока на поверхности. Плотность тока достигает результирующее значение, когда это результирующее поле  $B_{рез}$  становится критическим. Для проволоки радиусом  $R$  в магнитном поле  $B_a$ , перпендикулярном ее оси:

$$B_{рез} = 2B_a + (1/(2pR))m\theta.$$

Здесь значение  $2B_a$  на образующей цилиндра получено для коэффициента размагничивания  $u_m = 1/2$ .

Зависимость критического тока от внешнего поля  $B_a$  можно определить из уравнения:

$$I_c = (2pR)/m\theta(B_c - 2B_a).$$

Процесс нарушения сверхпроводимости в массивных образцах при достижении критической силы тока происходит с образованием промежуточного состояния. При включении внешнего магнитного поля происходит его наложение на круговое поле тока, в результате чего геометрия межфазных границ между сверхпроводящими и нормальными областями значительно усложняется.

В конце разговора о сверхпроводниках первого рода отметим, что низкие критические параметры делают практически невозможным их техническое использование.

### **Сверхпроводники второго рода.**

Принципиальное отличие сверхпроводника второго рода от сверхпроводника первого рода начинает проявляться в тот момент, когда

магнитное поле на поверхности достигает значения  $B_{c1}$ . При этом сверхпроводник переходит в смешанное состояние. Проникновение магнитного поля в объем сверхпроводника приводит к тому, что в этих условиях транспортный ток распределяется равномерно по всему сечению, не занятому вихревыми нитями. Таким образом, в отличие от сверхпроводников I рода, в которых ток протекает по тонкому поверхностному слою, в сверхпроводники II рода транспортный ток проникает во всем объеме.

Известно, что между током и магнитным полем всегда существует сила взаимодействия, которую называют силой Лоренса. Применительно к смешанному состоянию сверхпроводника эта сила будет действовать между абрикосовскими вихрями и транспортным током. Возможности транспортного перераспределения тока ограничены конечными размерами проводника, и, следовательно, под действием силы Лоренса вихревые нити должны перемещаться.

Для описания особенностей поведения сверхпроводников в магнитном поле проанализируем термодинамику образования поверхностей раздела между сверхпроводящей и нормальной фазами. В нормальной области  $B < B_c$ , в сверхпроводящей спадает до нуля на глубине порядка  $l$ . В нормальном состоянии плотность сверхпроводящих электронов равна нулю, в то время, как в сверхпроводнике она имеет определенную величину  $n_s(T)$ . На некотором расстоянии от границы  $x$  плотность сверхпроводящих электронов по порядку величины достигает значения, равного  $n_s(T)$ . Характеристический параметр  $x$  называют длиной когерентности, зависимость ее от температуры определяется формулой

$$z(T) = z_0 (T_c / (T_c - T))^5,$$

где  $z_0$  зависит от свойств сверхпроводника и составляет по порядку величины  $10^{-6} - 10^{-8}$  м.

## **Основы микроскопической теории сверхпроводимости.**

**Взаимодействие электронов с фотонами.** Ранее было показано, что переход от нормального к сверхпроводящему состоянию связан с определенным упорядочиванием в электронной системе твердого тела. На основании этого можно предположить, что переход в сверхпроводящее состояние обусловлен взаимодействием электронов друг с другом.

В принципе можно предположить различные механизмы такого взаимодействия. Были попытки объяснить упорядочение системы с помощью механизма кулоновского отталкивания электронов. Рассматривалось магнитное взаимодействие электронов, которые, пролетая через решетку с большими скоростями, создают магнитное поле и с помощью него взаимодействия между собой. Однако эти и другие подходы не позволяют построить теорию сверхпроводимости и объяснить электрические, магнитные и тепловые свойства сверхпроводников.

Конструктивной основой для создания такой теории стала идея о взаимодействии электронов через колебания решетки, сформулированная в 1950-51 гг. практически независимо друг от друга Г. Фрелихом и Дж. Бардиным. Такое рассмотрение позволило уже в 1957 г. Дж. Бардину, Л. Куперу и Дж. Шифферу создать микроскопическую теорию сверхпроводимости, получившая название БКШ ( по начальным буквам фамилий авторов).

Рассмотрим качественно механизм межэлектронного взаимодействия через колебания решетки. Как известно, ионы в кристаллической структуре совершают колебания около положений равновесия. Если в такую решетку поместить всего два электрона и пренебречь всеми остальными, то положительно заряженные ионы, расположенные вблизи этих электронов, будут притягиваться к ним. Образуются две области поляризации решетки, то есть скопления положительного заряда ионов

вблизи оказывающих поляризующее действие отрицательно заряженных электронов. Второй электрон и поляризованная им область решетки могут реагировать на поляризацию, вызванную первым электроном. При этом второй электрон испытывает притяжение к месту поляризации первого электрона, а следовательно, и к нему самому.

Рассмотренная выше модель имеет весьма существенный недостаток - она является статической. Реально электроны в металле имеют очень большие скорости (порядка  $10^6$  м/с) . Поэтому можно предположить, что электрон, перемещаясь по кристаллу, притягивает ионы и создает область избыточного положительного заряда. Такая динамическая поляризация является относительно устойчивой, поскольку масса ионов значительно больше, чем масса электронов. Таким образом, второй электрон, пролетая сквозь решетку, притягивается к этому сгустку положительного заряда, а следовательно, и к первому электрону. Отметим, что при высоких температурах ( больше критической) интенсивное тепловое движение узлов кристалла делает поляризацию решетки слабой, а следовательно, практически невозможным взаимодействие между электронами.

### **Энергетические щели.**

Для развития динамической модели будем полагать, что второй электрон движется по поляризованному следу первого электрона. При этом возможны две ситуации: первая - импульсы электронов одинаковы по величине и направлению, то есть они образуют пару частиц с удвоенным импульсом, вторая - импульсы электронов одинаковы по величине и противоположны по направлению. Такую корреляцию электронов также можно рассматривать, как пару с нулевым импульсом. Если электроны, кроме того, будут иметь противоположные спины, то такая пара будет обладать уникальными свойствами.

Чрезвычайно интересным с точки зрения понимания механизма сверхпроводимости является вопрос о процессах энергообмена в сверхпроводящем состоянии. В принципе ясно, что эти процессы связаны с разрушением куперовских пар и энергетическими переходами в системе свободных электронов, причем как первое, так и второе определяется совокупностью свободных состояний, в которые могут перейти электроны. Сложность рассматриваемой задачи связана с тем, что образование куперовских пар приводит к изменению квантово - механических состояний неспаренных электронов.

Распределение электронов в нормальном металле описывается функцией Ферми-Дирака

$$f(E) = (e^{(E-m)/(kT)} + 1)^{-1}.$$

Где  $k$  - постоянная Больцмана;  $m$  - химический потенциал.

При температуре  $T=0$  К полная функция распределения  $N(E)=f(E)g(E)$ , определяющая число частиц с энергией  $E$ , равна плотности числа состояний  $g(E)$ , так как  $f(E)=1$ :

$$g(E) = ((4pV)/n^3)(2m)^{3/2}E^{1/2}.$$

Взаимодействие электронов в сверхпроводнике с образованием куперовских пар приводит к тому, что небольшая область энергии вблизи уровня Ферми становится запрещенной для электронов - возникает энергетическая щель. В пределах этой щели нет ни одного разрешенного для неспаренных электронов энергетического уровня. Под влиянием взаимодействия между электронами, имеющими энергию, близкую к  $E_f$ , они оказываются как бы сдвинутыми относительно уровня.

При  $T=0$  К ширина щели максимальна ( $2d_0 \gg 10^{-2} - 10^{-3}$  эВ), а все свободные (неспаренные) электроны находятся под щелью (на уровне с энергией меньше  $E_f$ ). При повышении температуры часть куперовских пар разрушается, а некоторые неспаренные электроны “перескакивают” щель и

заполняют состояния с энергией больше  $E_f$ . Ширина щели  $2d(T)$  при этом уменьшается.

Между максимальной (при  $T=0$  К) шириной щели  $2d_0$  и критической температурой  $T_c$  существует прямая зависимость. По теории БКШ, удовлетворительно согласующейся с экспериментальными данными для большого числа сверхпроводников (кроме Nb, Ta, Pb, Hg):

$$2d_0 = 3,5 kT_c.$$

Ширина щели по этому соотношению определяется в эВ.

**Высокотемпературная сверхпроводимость.** Рассмотренный ранее механизм перехода в сверхпроводящее состояние основан на межэлектронном взаимодействии посредством кристаллической решетки, то есть за счет обмена фононами. Как показывают оценки, для такого механизма сверхпроводимости, называемая фононным, максимальная величина критической температуры не может превышать 40 К.

Таким образом, для реализации высокотемпературной сверхпроводимости (с  $T_c > 90$  К) необходимо искать другой механизм корреляции электронов. Один из возможных подходов описан американским физиком Литтлом. Он предположил, что в органических веществах особого строения возможна сверхпроводимость при комнатных температурах. Основная идея заключалась в том, чтобы получить своеобразную полимерную нитку с регулярно расположенными электронными фрагментами. Корреляция электронов, движущихся вдоль цепочки, осуществляется за счет поляризации этих фрагментов, а не кристаллической решетки. Поскольку масса электрона на несколько порядков меньше массы любого иона, поляризация электронных фрагментов может быть более сильной, а критическая температура более высокой, чем при фоновом механизме.



В основе теоретической модели высокотемпературной сверхпроводимости, разработанной академиком В.Л.Гизбургом, лежит так называемый экситонный механизм взаимодействия электронов. Дело в том, что в электронной системе существуют особые волны - экситоны. Подобно фононам они являются квазичастицами, перемещающимися по кристаллу и не связанными с переносом электрического заряда и массы. Модельный образец такого сверхпроводника представляет собой металлическую пленку в слоях диэлектрика или полупроводника. Электроны проводимости, движущиеся в металле, отталкивают электроны диэлектрика, то есть окружают себя облаком избыточного положительного заряда, который и приводит к образованию электронной пары. Такой механизм корреляции электронов предсказывает весьма высокие значения критической температуры ( $T_c=200\text{ K}$ ).

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.**

Идея высокотемпературной сверхпроводимости ( ВТСП ) в органических соединениях была выдвинута в 1950г. Ф.Лондоном и лишь 14 лет спустя появился отклик на эту идею в работах американского физика В.Литтла, вызвавший критические отзывы, отрицающие возможность ВТСП в неметаллических системах. Таким образом, хотя идея ВТСП родилась в работе Ф. Лондона в 1950г., годом рождения проблемы следует считать время появления первых, пока, правда, малочисленных потоков информации по ВТСП - 1964г.. Если рассмотреть эволюцию температуры сверхпроводящего перехода,, то станет ясно, что рост температуры сверхпроводящего перехода приводил к возможности использования хладагентов со все более высокой температурой кипения ( жидкий гелий, водород, неон, азот). Хотя до азотных температур перехода, открытых недавно в металлокерамиках, практически использовался для охлаждения жидкий гелий, однако скачки в росте температуры перехода

дают право положить их в основу периодизации ВТСП о гелиевом, водородном, неоновом и, наконец, азотном периодах ВТСП. Так Nb<sub>3</sub>Sn сменился Nb - Al - Ge, затем наибольшая температура была обнаружена d 1973-81гг. у Nb<sub>3</sub>Ge (23,9 К), которая оставалась рекордной вплоть до сверхпроводимости металлокерамиками. La - Sr - Cu - O при 30 К в 86г., вырастая до 100 К на материале I - Ba - Cu - O.

Ключевым для проблемы ВТСП является вопрос критической температуры от характеристики вещества. С открытием в 86 нового класса сверхпроводящих материалов с более высокими, чем ранее критическими температурами, во всем мире развернулись работы по изучению по изучению свойств ВТСП с целью определения возможности их применения в различных областях науки и техники. Интерес к ВТСП объясняется в первую очередь тем, что повышение рабочей температуры до азотной позволит существенно упростить и удешевить системы криогенного обеспечения, повысить их надежность. Для успешного применения ВТСП в сильноточных устройствах (соляноидах, накопителях энергии, электромагнитах, транспорте с магнитным подвесом) необходимо решить ряд вопросов. Одной из важнейших проблем при создании сильноточных устройств с использованием ВТСП является проблема обеспечения устойчивой работы обмоток с током. Проблема стабилизации ВТСП включает в себя несколько аспектов. Внутренним свойством сверхпроводимости является скачкообразный характер проникновения в них магнитного поля. Этот процесс сопровождается выделением части запасенной энергии магнитного поля при его распределении. Поэтому, наиболее важное направление стабилизации сверхпроводников - их стабилизация против сигналов потока. Кроме того, проводники, внутренне стабилизированные против сигналов потока, при работе подвергаются действию различного рода возмущений как механического, так и

электромагнитного характера, тоже сопровождающиеся выделением энергии.

#### Основные характеристики композитных ВТСП-проводников.

Традиционные сверхпроводники второго рода (сплавы Nb - Ti, соединение Nb<sub>3</sub>Sn ) применяются в сверхпроводящих магнитных системах в виде композитов с матрицей из нормального металла с высокими тепло- и электропроводностью. Наличие пластичной матрицы (чаще всего медной) значительно облегчает изготовление тонких длинномерных проводников волочением или прокаткой, то есть сверхпроводящие материалы отличаются хрупкостью. Стабильность сверхпроводимости - состояние относительно скачков магнитного потока - достигается путем изготовления проводников с весьма малым диаметром отдельных сверхпроводящих или же лент с малой толщиной сверхпроводящего слоя. По этим же причинам ВТСП-проводники в большинстве случаев изготавливаются в форме композитов, имеющих малую толщину или диаметр. Дополнительная причина применения нормального металла связана с необходимостью защиты ВТСП-материала от влажности и других факторов окружающей Среды, вызывающих деградацию оксидного сверхпроводника. Наилучшие результаты получены при использовании серебряной матрицы или обмотки сверхпроводника: кроме того, что серебро лишь в минимальной степени реагирует с ВТСП или его исходной продукции даже при высокой температуре синтеза, серебро отличается высокой диффузионной проницаемостью для кислорода, что необходимо при синтезе и обжиге ВТСП.

В настоящее время все усилия в области ВТСП наряду с совершенствованием их свойств и способов получения направлены на создание изделий на основе ВТСП, пригодных для применения в

радиоэлектронных системах для детектирования, аналоговой и цифровой обработки сигналов. (см. рис.1).

Основными достоинствами ВТСП являются отсутствие потерь на постоянном и сравнительно небольшие потери на переменном токах, возможность экранирования магнитных и электромагнитных полей, возможность передачи сигналов с крайне малыми искажениями.

Параметром, непосредственно определяющим высокочастотные свойства ВТСП материалов является их поверхностное сопротивление. В обычных металлах поверхностное сопротивление увеличивается пропорционально квадратному корню из частоты в то время, как в ВТСП - пропорционально ее квадрату. Однако, благодаря тому, что начальное значение поверхностного сопротивления ( на постоянном токе) у ВТСП на несколько порядков ниже, чем у металлов, высококачественные ВТСП сохраняют преимущества по сравнению с металлами при частоте до нескольких сотен гигагерц.

Интерес к вопросу практического использования сверхпроводников появился в 50-х гг, когда были открыты сверхпроводники второго рода с высокими критическими параметрами как по значению плотности тока, так и по величине магнитной индукции. В настоящее время использования явления сверхпроводимости приобретает все больше практическое значение.

Применение сверхпроводников потребовало решения ряда новых задач, в частности, интенсивного развития материаловедения в области низких температур. При это исследовались не только сверхпроводники собственно, но и конструкции и изоляционные материалы.

Наибольшее распространение из сверхпроводящих материалов в электротехнике получили сплав ниобий-титан и интерметаллид ниобий-олово. Технологические процессы изготовления исключительно тонких

ниобий-титановых нитей и их стабилизации достигли весьма высокого уровня развития. При создании многожильных проводников на основе ниобий-олова широкое применение находит так называемая бронзовая технология.

Развитие сверхпроводниковой техники также связано с созданием ожижителей и рефрижераторов все большей хладопроизводительности на уровне температур жидкого гелия.

Таблица “Сферы применения сверхпроводимости”

Применение	Примечания
экранирование	Сверхпроводник не пропускает магнитный поток, следовательно, он экранирует электромагнитное излучение. Используется в микроволновых устройствах, защита от излучения при ядерном взрыве.
Магниты - научно-исследовательское оборудование - магнитная левитация	НТСП магниты используются в ускорителях частиц и установках термоядерного синтеза. Интенсивно проводятся работы по созданию поездов на магнитной подушке. Прототип в Японии использует НТСП.
передача энергии, аккумулярование, вращающиеся электрические машины, вычислительные устройства	Прототипные линии НТСП продемонстрировали свою перспективность. Возможность аккумуляровать электроэнергию в виде циркулирующего тока. Комбинация полупроводниковых и сверхпроводящих приборов открывает новые возможности в

Наиболее широкое реальное применение сверхпроводимость находит при создании крупных электромагнитных систем. В 80-х гг в СССР был осуществлен запуск первой в мире установки термоядерного синтеза Т-7 со сверхпроводящими катушками тороидального магнитного поля.

Сверхпроводящие катушки используются также для пузырьковых водородных камер, для крупных ускорителей элементарных частиц. Изготовление таких катушек для ускорителей довольно сложно, так как требование исключительно высокой однородности магнитного поля вызывает необходимость точного соблюдения заданных размеров.

В последние годы имеет место все более широкое использование явления сверхпроводимости для турбогенераторов, электродвигателей, униполярных машин, топологических генераторов, жестких и гибких кабелей, коммутационных и токоограничивающих устройств, магнитных сепараторов, транспортных систем и др.. Следует также отметить важное направление в работах по сверхпроводимости - создание измерительных устройств для измерения температур, расходов, уровней, давлений и т.д.

На настоящий момент имеются два главных направления в области применения сверхпроводимости. Это прежде всего магнитные системы различного назначения и затем - электрические машины (прежде всего турбогенераторы).

Применение сверхпроводимости в турбогенераторах большой мощности перспективно потому, что именно здесь удастся достигнуть того, чего при других технических решениях сделать невозможно, а именно, уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. В обычных машинах это уменьшение всегда связано с увеличением потерь

и трудностями обеспечения высокого КПД. Здесь этот вопрос решается радикально: массу турбогенераторов можно увеличить в 2-2,5 раза, в тоже время в связи с отсутствием потерь в роторе удастся повысить КПД примерно на 0,5% и приблизиться для крупных турбогенераторов к КПД порядка 99,3%. Повышение КПД турбогенераторов на 0.1% компенсирует затраты, связанные с созданием генераторов на 30%. В этих условиях экономия энергии, получаемая за счет снижения потерь, очень быстро оправдывает те затраты, которые вкладываются в создание новых сверхпроводниковых машин. Экономически это, конечно, оправдано, но все дело в том, что для того, чтобы выйти в энергетику с большими машинами, нужно пройти очень сложный путь создания машин все больших мощностей. При этом нужно решать и более трудную проблему - обеспечение высокой надежности. Очень важным моментом в этой связи, является отработка токовводов при создании машин высокой мощности. Перепад температур на токовводах составляет около 300К, они имеют внутренние источники тепловыделения, и поэтому представляют собой один из наиболее напряженных в эксплуатационном отношении узлов сверхпроводникового электротехнического устройства, являясь потенциально опасным источником аварий в криогенной зоне. Поэтому, при разработке токовводов, в первую очередь необходимо обращать внимание на надежность их работы, обеспечивая ее даже в ущерб тепло- и электрохарактеристикам токовводов.

## 7. ТРАНСПОРТ

### **Звездные корабли.**

Первый термоядерный взрыв, прогремевший 1 ноября 1952 года, дал человечеству надежду не только на освоение неисчерпаемого источника энергии, но и на создание принципиально новых ракетных двигателей,

способных доставить наши космические корабли к далеким планетам и даже к соседним звездам.

«Планета есть колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели», – сказал Константин Циолковский. Для полетов к Луне или, например, к Марсу достаточно существующих химических ракетных двигателей. Но для того чтобы летать дальше, к внешним планетам Солнечной системы (или даже ближайшим звездам!), и не тратить на это многие годы и десятилетия, нужны двигатели принципиально нового типа.

«Популярная механика» уже писала о проектах ядерных двигателей («К Марсу на реакторе», «ПМ» № 1'2007). Однако энергия и температура ядерного распада существенно меньше той, которую может дать термоядерный синтез. Неудивительно, что еще в конце 1950-х годов возникла идея использовать для двигателей энергию, благодаря которой горят звезды, – энергию термоядерного синтеза.

### **Немного физики.**

Любой ракетный двигатель создает тягу, выбрасывая в окружающее пространство вещество, которое называют рабочим телом. Из дюз обычных ракет истекают газообразные продукты сгорания топлива. В электроракетном двигателе рабочим телом служит поток плазмы, разогнанной электромагнитными силами. В ядерном – водород или гелий, разогретый энергией деления ядер урана или плутония.

Сила тяги любого двигателя зависит от скорости, с которой молекулы рабочего тела выбрасываются из сопла. Подняв температуру, можно увеличить энергию (и скорость) молекул. Однако жаропрочные материалы и конструкции имеют свои пределы, к тому же подводимая энергия тоже ограничена. А можно использовать более легкие молекулы, поскольку при одной и той же энергии их скорость будет больше. Ядерные двигатели, которые могут разогревать легкий водород, в этом отношении имеют



серьезное преимущество перед химическими, продукты сгорания которых существенно тяжелее.

Помимо собственно тяги, очень важным показателем ракетного двигателя является его удельный импульс (или удельная тяга) – отношение силы тяги к расходу рабочего тела. Эта величина, имеющая размерность м/с, характеризует эффективность двигателя. Теоретически она равна скорости истечения рабочего тела, а на практике может значительно отличаться, поэтому ее называют эффективной (эквивалентной) скоростью истечения.

Удельный импульс (в м/с) имеет и другой наглядный физический смысл: численно это время в секундах, в течение которого один килограмм топлива может создавать тягу в 1 Н (или тяга в ньютонах, достигаемая при ежесекундном выбросе одного килограмма рабочего тела).

#### **Границы дозволенного.**

В 1897 году Константин Эдуардович Циолковский вывел знаменитую формулу, определяющую максимальную конечную скорость одноступенчатой ракеты: она равна эффективной скорости истечения рабочего тела (удельному импульсу двигателя), помноженной на натуральный логарифм отношения начальной и конечной масс ракеты.

Первый множитель определяется типом и конструкцией двигателя, а второй медленно растет даже при большом количестве топлива. Например, для того чтобы разогнать ракету конечной массой 10 т до скорости выше второй космической (11,2 км/с) с помощью обычных современных ракетных двигателей с импульсом 3000 м/с, нужно около 500 т топлива и окислителя.

Даже с учетом технологии многоступенчатых ракет практически невозможно достичь скорости, превышающей удельный импульс более чем в четыре-пять раз. Поэтому с самого начала космических разработок

серьезные силы были брошены на увеличение эффективной скорости истечения рабочего тела. Сейчас лучшие ракетные двигатели на химическом топливе (водород-кислородные) лишь приближаются к отметке 4500 м/с, и почти все способы улучшения их характеристик уже исчерпаны.

Ядерные ракетные двигатели позволили бы увеличить температуру до десятков тысяч градусов, а скорость истечения – примерно до 20000 м/с, но даже с такими двигателями полет корабля до внешних планет Солнечной системы занял бы годы. А о полетах к звездам и говорить не приходится.

### **Настоящие звездолеты.**

Между тем существует способ поднять скорость истечения на многие порядки. Температура плазмы при термоядерном синтезе составляет не десятки тысяч, а миллионы градусов. Соответственно, теоретический удельный импульс при реакции дейтерия и гелия-3 составляет 21 500 000 м/с, то есть более 7% от скорости света, что потенциально позволяет разогнать межзвездный зонд до 25–30% от скорости света. Конечно, нужно оставить запас топлива на торможение, но и 10–15% световой скорости вполне достаточно для отправки беспилотных аппаратов как минимум к нашим ближайшим соседям – звездной системе Альфа Центавра.

Правда, это только в теории. Дело в том, что мощность ракетного двигателя равна половине произведения его тяги (Н) на его удельный импульс (м/с). Мощность, например, двигателя первой ступени ракеты-носителя «Зенит» РД-171 с тягой 806 тс и удельным импульсом 3300 м/с – 13 ГВт (в два раза больше Саяно-Шушенской ГЭС!). Термоядерный двигатель такой же мощности с удельным импульсом в 21 500 000 м/с будет иметь тягу всего 123 кгс, и разгон до сколько-нибудь существенных

скоростей займет долгие годы. У этой проблемы может быть два решения. Во-первых, можно попробовать увеличить мощность двигателя.

Но, увы, даже 13 ГВт мощности (выходной, а не термоядерной!) выглядят труднодостижимыми на практике. Во-вторых, можно снизить удельный импульс. Уже 100 000 м/с откроют нам совершенно новые возможности освоения Солнечной системы. При этом 1 ГВт выходной мощности будет соответствовать 20 000 Н или более 2 тс тяги – вполне достаточно даже для тяжелого (сотни тонн «сухой» массы) межпланетного корабля, не предназначенного для входа в атмосферу.

### **Магнитные ракеты.**

За редчайшим исключением, все проекты термоядерных ракетных двигателей с магнитным удержанием основываются на так называемых открытых магнитных ловушках – цилиндрах, из торцов которых истекает поток плазмы. Если для энергетического реактора («ПМ» № 5'2012) такие потери плазмы являются серьезной проблемой, то для термоядерного двигателя это смысл его работы, так как именно поток плазмы из торца двигателя и создает тягу.

Удельный импульс двигателя определяется температурой плазмы и может достигать нескольких миллионов метров в секунду. Напуск в районе торца двигателя дополнительного рабочего тела (обычного водорода) может более чем на порядок повысить тягу двигателя (естественно, в ущерб удельному импульсу).

Самый простой вариант такого двигателя – пробкотрон, состоящий всего из двух магнитных катушек, пробок, расположенных на некотором удалении друг от друга. Иногда посередине добавляют менее мощные катушки, которые позволяют управлять профилем магнитного поля между пробками. При достаточно большом размере в пробкотроне может

проходить термоядерная реакция, выделяющая чуть больше энергии, чем тратится на ее поддержание.

Но, увы, совсем ненадолго и только при работе на смеси дейтерия и трития. Поскольку КПД преобразования тепловой энергии в электрическую невелик, пробкотрон всегда будет требовать для своей работы подвода энергии извне. Если вспомнить, какие мощности необходимы для создания существенной тяги при большом удельном импульсе, получится, что для питания двигателя нам потребуется полномасштабная космическая АЭС. В таких условиях проще отказаться от термоядерного реактора и использовать куда более простую и существенно лучше отработанную связку из АЭС и электрореактивных двигателей.

Развитием идеи пробкотрона является многопробочная ловушка (с гофрированным полем). В первом приближении путем увеличения ее длины можно достичь сколь угодно хорошего удержания плазмы, вплоть до зажигания самоподдерживающейся термоядерной реакции, не требующей подвода энергии извне. С учетом высокой плотности плазмы, которую можно достичь в ловушке такого типа, она производит впечатление весьма перспективного кандидата. Увы, есть две проблемы, существенно снижающие перспективность этого направления.

Первая – это потери плазмой энергии поперек магнитного поля, которые для установок большой длины, скорее всего, станут основными. Вторая проблема состоит в том, что даже для смеси дейтерия и трития (1:1) необходимая длина двигателя составит около 1 км, а это на порядок превосходит размер МКС (для других видов топлива размеры двигателя будут еще больше).

Другим развитием пробкотрона является газодинамическая плазменная ловушка, в которой длинная область с однородным магнитным полем

относительно небольшой напряженности с обоих концов заканчивается мощными магнитными пробками или парами пробок (дополнительными пробкотронами с мощным полем). Положительное свойство такой ловушки – хорошо предсказуемое поведение плазмы в ней. Однако ее длина, как и в случае многопробочной ловушки, должна будет составлять около километра или более даже при дейтерий-третиевом топливе.

Еще один вариант открытых ловушек – это ловушки с амбиполярным удержанием плазмы. В простейшем случае это система из трех пробкотронов: один центральный с очень большой длиной и два маленьких на торцах. Непрерывно подаваемая разогретая плазма в торцевых пробкотронах не дает уходить плазме из центрального пробкотрона. Сделав центральную часть достаточно длинной, мы всегда можем производить в ней больше энергии, чем нужно для поддержания плазмы в концевых участках. Такая ловушка теоретически должна получиться заметно короче газодинамической или многопробочной.

Но есть у нее и недостатки. Во-первых, обязательная инжекция плазмы в концевых участках и нагрев ее там, на что требуются десятки и даже сотни мегаватт. Таким образом, реактор должен стать не только двигателем, но и основой полномасштабной электростанции для поддержания собственной работы. Во-вторых, конфигурация электромагнитного поля в амбиполярной ловушке куда сложнее, чем в других типах открытых ловушек, а объем экспериментальных данных недостаточен. Так что пока говорить об осуществимости такого двигателя слишком рано.

### **Силы инерции.**

В ловушках с магнитным удержанием удельный импульс ограничен температурой плазмы, которая, в свою очередь, ограничена конструкцией. А вот инерциальный ядерный синтез потенциально позволяет получить

удельный импульс порядка 10 000 000 м/с (около 3% от скорости света), что делает его идеальным вариантом для межзвездных зондов. Именно этот принцип был использован в известном проекте звездолета «Дедал», который разрабатывался группой специалистов из Британского межпланетного общества в 1970-х годах. Его же использует разрабатываемый сейчас наследник «Дедала» – «Икар».

Термоядерные двигатели на инерциальном синтезе – это импульсные термоядерные реакторы, дополненные магнитным соплом для продуктов реакции. Поскольку зажигание самоподдерживающейся реакции здесь принципиально невозможно, реактор должен быть не только двигателем, но и электростанцией для обеспечения энергией самого себя. Причем его электрическая мощность должна составлять как минимум 10% от мощности реактивной струи.

Расчеты показывают, что при тяге двигателя всего 2000 Н (204 кгс) и удельном импульсе 10 000 000 м/с нам потребуется мощность ракетного двигателя в 10 ГВт, а электрическая – не менее 1 ГВт. Это мощность целого энергоблока крупной АЭС.

Кроме того, нет оснований полагать, что в сколько-нибудь обозримом будущем будут созданы космические лазеры, пригодные для обжаривания мишеней такого двигателя. Единственным реалистичным вариантом можно считать использование пучков тяжелых ионов. Но и они, с нужными характеристиками, еще не созданы даже для наземных установок.

### **Токамаки в космосе.**

Почти все авторы проектов термоядерных двигателей игнорируют токамаки, ссылаясь на сложность осуществления отбора плазмы для реактивной струи. Но они ошибаются. На заре термоядерных исследований предполагалось, что в токамаке плазма будет надежно

удерживаться. Однако быстро выяснилось, что плазма поперек магнитного поля уходит на стенку установки и разрушает ее.

Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы оказалась концепция дивертора. Суть ее в том, что в конфигурации магнитного поля создается четкая граница – сепаратриса. Внутри сепаратрисы плазма максимально хорошо удерживается, но за ее пределами почти мгновенно уходит на специальные пластины в нижней (чаще всего) части установки, которая и называется дивертором.

Таким образом взаимодействие между термоядерной плазмой и стенкой существенно ослабляется. Ничто не мешает использовать плазму, пересекающую сепаратрису и уходящую в дивертор, для создания тяги в ракетном двигателе. Напуск водорода в область дивертора позволит, как и в случае открытых ловушек, на порядок повысить тягу, пожертвовав удельным импульсом.

Важнейшее преимущество токамака перед всеми иными концепциями термоядерных ракетных двигателей – максимальная отработанность этого типа магнитных ловушек. Если параметры созданных открытых магнитных ловушек хуже необходимых в сотни раз, то параметры токамаков нужно улучшить всего на порядок. Кроме того, наработки по термоядерному ракетному двигателю окажутся крайне полезными для наземных термоядерных электростанций.

Расчеты показывают, что сферический токамак с сильным магнитным полем, работающий на смеси 98% дейтерия и 2% трития, способен развивать выходную мощность порядка 300 МВт. Объединяя несколько таких токамаков, можно получить тягу порядка 1000 кгс при удельном импульсе в 350 000 м/с, при этом расход дейтерия составит 1,5 г/с, а водорода, используемого как дополнительное рабочее тело, – около 26 г/с. Корабль «сухой» массой 565 т, несущий 35 т дейтерия и 600 т водорода,

сможет разогнаться до скорости 65 км/с, затормозить, снова разогнаться до этой скорости и снова затормозить. Такие параметры позволяют уложить длительность экспедиции к Сатурну в два года.

### **Полный бак.**

На чем же будут работать звездолеты? Выбор топлива – отдельная серьезная проблема. Проще всего запустить реакцию в смеси дейтерия и трития 1:1. Однако с ее использованием есть большие проблемы. Тритий в природе не встречается, его необходимо получать искусственно. Необходимые количества при этом составят десятки тонн, что во много раз превышает возможности его производства за всю историю! Кроме того, он радиоактивен (хотя и слабо) и благодаря этому саморазогревается, так что его практически невозможно хранить в сжиженном виде, а хранить под давлением, да еще и охлаждать – не самая простая задача.

Поэтому логичным решением представляется производство трития из лития прямо в двигателе, как это планируется делать на термоядерных электростанциях. Но за один проход через реактор успевает прореагировать лишь доля процента термоядерного топлива (в реакторах с инерциальным удержанием – до 10%). В электростанции вся отработанная (попавшая в дивертор) плазма собирается, и тритий может быть использован повторно. Но в двигателе эта плазма выбрасывается, так что на один атом трития, вступивший в реакцию, нужно произвести сотни новых. Однако это невозможно: один термоядерный нейтрон в лучшем случае может произвести два атома трития.

Использование смеси дейтерия и гелия-3 позволяет максимум термоядерной энергии задействовать в производстве тяги, так как «горение» такой смеси дает куда меньше нейтронов и больше быстрых заряженных частиц. Гелий-3 стабилен и совершенно безопасен. Но его на Земле нет. Единственный источник гелия-3 – распад трития, так что



производство его в количестве десятков тонн – еще более сложная задача. Теоретически гелий-3 можно добывать на Луне, но для этого потребуются создание мощной космической инфраструктуры (для чего как раз очень пригодился бы термоядерный ракетный двигатель). Стоит отметить еще две проблемы смеси дейтерия и гелия-3: во-первых, она требует куда большей температуры и времени удержания плазмы, а во-вторых, дает меньшую мощность на единицу объема плазмы.

Поэтому первые термоядерные ракетные двигатели будут работать либо на чистом дейтерии, либо на дейтерии с небольшой (не более нескольких процентов) примесью трития. Недостатки у этого топлива такие же, как и у смеси дейтерия и гелия-3, плюс еще мощное нейтронное излучение. Зато дейтерий относительно дешев и доступен практически в неограниченных количествах. Концентрация примеси трития будет определяться тем, сколько его удастся произвести из лития. Даже небольшая примесь этого изотопа может позволить существенно повысить термоядерную мощность реактора.

### **Автомобили научатся предвидеть опасность.**

Когда дело касается перспективных разработок, производители, как правило, стараются до последнего хранить технические подробности своих успехов в секрете. Удивительное и воодушевляющее исключение – системы коммуникаций Car 2 Car (автомобиль – автомобиль) и Car 2 Object (автомобиль – объект дорожной инфраструктуры), над которыми крупнейшие производители, университеты и правительства трудятся сообща, всем миром.

Начнем с того, что с ноября этого года базовая система Car 2 Car будет обязательна для коммерческих автомобилей в Европе. Грузовик или фургон, совершающий экстренное торможение, обязан отправить сигнал

тревоги в радиозфир, чтобы следующий за ним автомобиль затормозил в автоматическом режиме.

Члены международного консорциума Car 2 Car Communications работают над тем, чтобы автомобили разных марок могли предупреждать друг друга об экстренной остановке за поворотом, проезде на красный свет, скользкой дороге и прочих опасностях. В Европе и США объявлены открытые конкурсы на разработку коммуникационных систем, удовлетворяющих требованиям технологии по скорости и надежности.

По всей вероятности, машины будут общаться друг с другом по проверенному временем протоколу Wi-Fi, а с крупными участками дорожной сети – по сотовой связи. Главная проблема, которую предстоит решить, – скорость установки связи с новыми узлами сети. Если обычно подключение к ближайшей точке Wi-Fi (проверка пароля, шифрования, протоколов) может занимать несколько секунд, то автомобилям необходимо знакомиться друг с другом за сотые доли секунды.

Тем не менее некоторыми функциями Car 2 Car Communications уже в этом году начнет оснащать свои модели Mercedes-Benz. Интересно, что пока технология будет реализована в виде приложения для операционной системы автомобиля или даже смартфона, поэтому воспользоваться ею смогут даже владельцы ранее выпущенных «Мерседесов».

### **На помощь водителю придет автопилот.**

Адаптивный круиз-контроль, автоматически поддерживающий дистанцию до впереди идущего автомобиля, давно прописался в авто люксового класса. Система Lane Assist, которая помогает машине двигаться в пределах полосы, ориентируясь на дорожную разметку, менее популярна в России (в силу недостаточного распространения самой разметки), но пользуется успехом в мире. Очевидно, что если сложить эти две системы вместе, то получится автопилот.

Конечно же, на деле все несколько сложнее. Формально автопилот предписывает водителю не отвлекаться от дороги, на практике же всем понятно, что именно этой возможности ждут от электронного помощника автолюбители. А значит, от системы требуется намного большая надежность и точность, чем от обычного круиз-контроля или Lane Assist.

Тем не менее за последний год мы стали свидетелями увлекательной гонки автопроизводителей за право первым выпустить на рынок автопилот. Выиграл ее, похоже, Mercedes-Benz. Новый S-Klasse уже оснащается системой Steering Assist, благодаря которой водитель может доверить руль компьютеру при движении в пробках и по шоссе. Кстати, Steering Assist не только первый, но еще и самый быстрый автопилот – он работает в диапазоне скоростей от 0 до 120 км/ч.

Системы автопилота используют радар для измерения дистанции до впередиидущего и ближайших к нему автомобилей. Для точного измерения на малых скоростях используется лазерный дальномер. Стереокамера также фиксирует расстояние до объектов по параллаксу, но главное – определяет направление их движения, а также контролирует дорожную разметку и край дорожного полотна.

Audi обещает представить автопилот на модели A8 2016 года, однако его скоростной порог будет ниже и составит 50 км/ч. К концу 2014 года свет увидит кроссовер Volvo XC90 с автопилотом, скоростные параметры которого пока не определены.

### **Рулевой вал заменят провода.**

Аэродинамические рули пассажирских самолетов давно управляются компьютером: отклоняя ручку управления, пилот лишь задает нужную угловую скорость, а электроприводы исполняют его команду с оглядкой на ветер, перегрузки, опасность сваливания или штопора. При этом летчики

никогда не жалуются на нехватку обратной связи и недостаточное удовольствие от управления.

Вскоре и автомобилистам предстоит испытать нечто подобное. Компания Infinity обещает уже к концу года представить публике серийный автомобиль с управлением steer-by-wire, в котором не будет прямой механической связи между рулем и колесами. Система включает датчик угла поворота баранки, сервопривод поворота колес, скомпонованный с электроусилителем рулевого управления, и целых три одинаковых электронных блока управления, дублирующих друг друга в случае неисправности.

Парадокс заключается в том, что управление автомобилем по проводам должно показаться более отзывчивым, острым и натуральным, чем обычное. Электронный блок управления возьмет на себя часть функций водителя и поможет управлять автомобилем в некоторых ситуациях. К примеру, колеса будут сами подруливать при боковом ветре, поперечном уклоне дороги, рысканье в колее. При этом информация о неровностях на руль не передастся, поэтому водитель будет воспринимать работу системы как естественную курсовую устойчивость автомобиля.

Мало того, автомобиль станет послушнее при резких маневрах, потому что компьютер поможет ему входить в поворот. Дело в том, что пятно контакта шины с дорогой поворачивается с некоторым запаздыванием относительно колесного диска из-за гибкости шин. Скомпенсировать этот эффект можно, на мгновение повернув колеса чуть сильнее, чем того требует траектория. Этот трюк, сложный даже для профессионального гонщика, вполне по силам компьютеру.

Специалисты Nissan прекрасно понимают, что подавляющее большинство водителей сегодня не готовы полностью довериться электронному управлению. Поэтому в первых моделях со steer-by-wire

останется старый добрый рулевой вал, но оснащенный сцеплением, включающимся только в случае отказа электроники.

### **Активная безопасность станет активнее.**

Сегодня многие автомобили оснащаются системой автоторможения (яркий пример – Volvo City Safety). Нередко водители и не подозревают об их существовании, даже после ДТП. Дело в том, что нынешние системы активируются только в том случае, когда столкновение неизбежно, и ставят перед собой цель свести к минимуму последствия аварии. Причина понятна: система не может вмешиваться в управление до тех пор, пока у водителя еще есть шанс совершить маневр уклонения. А когда такого шанса не остается, тормозить уже поздно.

Система экстренного маневрирования Nissan Autonomous Emergency Steering может предотвратить ДТП, самостоятельно изменив траекторию автомобиля. Во время движения компьютер изучает пространство вокруг машины с помощью лазерных сканеров, радаров и видеокамер и вычисляет так называемую зону уклонения – свободное пространство по сторонам от нескольких впереди идущих авто.

Если возникает опасность столкновения (машина впереди экстренно тормозит, за поворотом оказывается сломанный автомобиль, на дорогу выскакивает пешеход), компьютер предупреждает водителя звуковым и световым сигналом. Если водитель не реагирует, компьютер сам направляет автомобиль в зону уклонения, и столкновения не происходит.

Если зоны уклонения нет, включается автоторможение, чтобы столкновение произошло на наименьшей возможной скорости. Искусственный интеллект автомобиля Nissan достаточно сообразителен, чтобы учитывать правила дорожного движения, не позволять машине выскакивать на встречную полосу и съезжать с дороги в канаву.

К сожалению, на серийных автомобилях подобная система появится не раньше, чем через пять лет. Причина тому – юридические тонкости: непонятно, кто будет нести ответственность, если в процессе маневра уклонения автомобиль все же спровоцирует ДТП.

Гораздо раньше можно ожидать появления системы, которая поможет водителям, путающим педали. Речь идет о маневрировании на парковках и в ограниченном пространстве на малых скоростях. Система опирается на показания камер и парковочных радаров. Если препятствие близко, а водитель слишком рьяно жмет на газ, компьютер заботливо ограничивает подачу топлива в двигатель.

### **Машинки для взрослых тоже будут заводными.**

Основная идея гибридов – запастись энергией торможения, чтобы затем пустить ее на разгон или поддержание движения – одинаково хорошо применима и для дорог общего пользования, и для гоночной трассы. Но если на привычных нам дорожных гибридах энергия запасается в электрических аккумуляторах, то в «Формуле-1» для этого давно используется

маховик.

Распределение ролей вполне понятно.

Вращающийся с бешеной скоростью металлический диск, пусть даже заключенный в герметичную безвоздушную камеру, не способен долго хранить энергию. Для гоночной трассы, где разгоны регулярно сменяются торможениями, это не помеха. Зато маховик намного легче электрической батареи. В городе же, где ритм движения непредсказуем, необходимо хранить энергию и во время долгих перегонов по ровным шоссе, и на светофорах, и даже на парковке. Здесь не обойтись без аккумулятора.

И все же появление маховиков KERS (Kinetic Energy Recovery System) на обычных легковушках вполне вероятно. Это доказал экспериментальный Volvo S60, продемонстрировавший на полигонных

испытаниях 25%-ную экономию топлива. Емкость маховика Volvo – всего 0,15 кВт•ч – вчетверо меньше, чем у батареи самого скромного гибрида.

Тем не менее, раскручиваясь до 60 000 об/мин, он способен удерживать запас энергии в течение 30 минут и добавлять силовой установке лишние 80 л.с. Маховик приводит заднюю ось автомобиля и отбирает энергию от нее же с помощью специальной трансмиссии. Передача энергии происходит исключительно механическими средствами.

На шоссе маховик способен в одиночку поддерживать скорость автомобиля с полностью отключенным двигателем. В спортивном режиме его энергия используется для усиления разгона, позволяя сбросить в спурте до сотни целых полторы секунды.

О производственных планах относительно машин с KERS шведский производитель пока молчит. И все же рискнем предположить, что при стоимости всего «ускорителя» всего в \$200 (ничтожно мало по сравнению с литий-ионными батареями, инверторами и электромоторами обычных гибридов) его шансы попасть на конвейер весьма велики.

### **Дождь станет невидимым, а фары будут не нужны.**

Современные приборы ночного видения представляют собой громоздкие вакуумные трубки, которые транслируют изображение на крохотный экран. К тому же они настолько дороги, что позволить их себе могут пока лишь владельцы редких люксовых машин.

Специалисты DARPA обещают вывести ночное видение на новый уровень с помощью тончайшей пленки из органических светодиодов OLED, каждый из которых способен трансформировать инфракрасное (тепловое) излучение в видимый свет. Пленка потребляет минимум электроэнергии и настолько тонка, что изначально задумывалась военными как покрытие для очков. Возможно, в будущем ею вполне можно будет покрыть лобовое стекло целиком, позволив водителю видеть

в темноте в привычном масштабе и обстановке. Правда, пока что DARPA удалось изготовить лишь несколько квадратных сантиметров драгоценного материала.

Компания Intel работает над фарами, которые сделают дождь невидимым. Сегодня, попадая в ливень ночью, водитель не видит практически ничего, кроме светящейся водяной стены прямо перед лобовым стеклом, так как капли воды хорошо отражают свет фар. Головная оптика от Intel представляет собой высокоскоростной проектор, который может светить между каплями, но сами капли оставлять в тени. О положении капель проектору сообщает видеокамера, расположенная под лобовым стеклом.

В это с трудом верится, но лабораторные образцы фар от Intel точно простреливают лучами света в промежутки между каплями, делая дождь невидимым. Однако на то, чтобы довести технологию до производства, компании потребуется не менее десяти лет.

### **Парковаться больше не придется. Никогда.**

Системой автоматической парковки сегодня никого не удивишь: водители многих современных авто могут поставить машину параллельно или перпендикулярно проезжей части, доверив руль компьютеру и контролируя лишь педаль тормоза.

Однако впередсмотрящие автомобильного мира давно подразумевают под автоматической парковкой несколько иной сценарий: остановившись у въезда на паркинг, водитель выходит из машины и отправляется по своим делам. Автомобиль сам объедет все ряды в поисках свободного места и припаркуется, причем плотнее и компактнее, чем обычно, – ведь открывать двери уже не нужно. Обратный процесс выглядит аналогично: водитель вызывает машину со смартфона, и она подбирает его на месте встречи.



Подобные концепты уже продемонстрировали многие автопроизводители из Японии, Германии, Швеции. Журналисты даже имели честь воочию лицезреть, как хетчбэк Volvo курсирует по паркингу в поисках теплого местечка. Однако это был всего лишь спектакль, разыгранный по заранее разработанному сценарию. Технологическая сторона данной концепции пока не проработана. Вопросы очевидны. Должен ли автомобиль полагаться лишь на свои датчики и вычислительные мощности или им должна управлять интеллектуальная инфраструктура паркинга?

Можно ли допускать людей на территорию, где машины ездят без водителей? Как скоро паркинги станут умными, и как много совместимых с ними машин удастся продать?

Разные производители подходят к проблеме с разных сторон. Volvo обучает машину полностью контролировать обстановку, опасаться незадачливых пешеходов, искать подходящие места с помощью камер.

Audi заключила контракт с сервисом INTRIX – электронной базой данных, в реальном времени обрабатывающей данные о свободных местах на 42 000 парковок в Европе и 18000 в США. Информация о близлежащих парковках и свободных местах на них уже выводится на экран информационной системы новых Audi. Чем не первый шаг к интеллектуальной инфраструктуре паркингов?

В любом случае автомобили научатся парковаться самостоятельно раньше, чем подвозить спящего водителя домой, – ведь движение на паркингах куда более упорядоченное и предсказуемое, чем на городских улицах.

### **Черные крылья России**

Использование композитных материалов в авиации – один из главных трендов индустрии. Уже отвоевывает свое место под солнцем (хоть и не

без болезней роста) Boeing-787. Возможно, еще до выхода в печать этого номера совершит первый полет главный конкурент «дриллайнера» – А350. Композитный прорыв готовит канадская компания Bombardier. А что же Россия?

Несколько лет назад, когда российская корпорация «Иркут» обнародовала детали проекта нового среднемагистрального лайнера МС-21, в котором предполагается использовать до 40% композитных деталей, многие задавались вопросом: «А где, собственно, эти компоненты будут производиться?» Нельзя сказать, что тема углепластика была совсем чужда отечественной индустрии (ею занимались еще в СССР), но участие в «композитной революции» в авиастроении безусловно требовало самого современного ноу-хау.

Производств и технологий такого класса в России тогда не было. Сегодня, когда работы над МС-21 в рамках Объединенной авиастроительной корпорации идут полным ходом, появилась ясность и с композитными деталями. Их будут выпускать в двух знаменитых городах на Волге.

### **В поисках конкурентных преимуществ.**

«Магистральный самолет XXI века» (МС-21), как предполагается, совершит свой первый полет в 2015 году. Лайнер – «одноклассник» уже фактически выведенного из коммерческой эксплуатации Ту-154 и мелкосерийного Ту-204/214. Его основные соперники – самолеты семейств Boeing 737 и Airbus 320. Российские авиастроители исполнены желанием не повторять ошибок прошлого и создать воздушное судно, которое к началу эксплуатации имело бы реальные экономические преимущества перед конкурентами.

Одной из фирменных фишек и станет беспрецедентно широкое для самолета этого класса использование композитных деталей: применение

углепластика позволит не только снизить вес лайнера по сравнению с полностью металлическим аналогом, но и создавать детали с более сложным и совершенным аэродинамическим профилем.

В отличие от Boeing 747 и A350, в МС-21 фюзеляж останется металлическим: из углепластика полностью изготовят крыло и хвостовое оперение. Есть и еще одно важное отличие: крыло нового российского самолета будет производиться по технологии, которая в гражданском авиастроении вообще до сих пор не применялась, – вакуумно-инфузионной.

Чтобы познакомиться с этим ноу-хау поближе, корреспонденты «ПМ» отправились в московскую лабораторию ЗАО «Аэрокомпозит». Эта компания, созданная в 2008 году в рамках ОАК на базе холдинга «Сухой», как раз и призвана стать так называемым центром компетенции по вопросам разработки композитных технологий для российского авиапрома. Во время посещения лаборатории нас сопровождал Алексей Ульянов, заместитель начальника технологического департамента компании.

Для начала Алексей объяснил нам разницу в технологиях производства углепластика. «Более традиционная, автоклавная технология, – говорит он, – предполагает использование препрегов, то есть фрагментов ткани из углеволокна, предварительно пропитанной связующим веществом. Препреги выкладываются на оснастку, а затем получившаяся деталь запекается в автоклаве под давлением. Именно по этой технологии делают все свои компоненты Boeing и Airbus.

При вакуумно-инфузионной технологии препреги не используются. На оснастку выкладываются сухие полоски ткани из углеволокна (они имеют, как правило, тонкое клеевое покрытие для фиксации на оснастке).

Связующее подается на ткань непосредственно перед термообработкой в печи (а не в автоклаве)».

### **В мешок да в печку!**

Лаборатория не производит реальных деталей для самолетов – здесь разрабатывают технологии создания элементов крыла, проводят механическую обработку получившихся образцов, испытывают их на удар, растяжение, сжатие. Перед нашими глазами проходят все этапы цикла производства. Вот в «чистой комнате», где поддерживается специальный режим чистоты температуры и влажности воздуха, идет раскрой ткани.

Не по линейкам и лекалам, а по указаниям висящих под потолком лазерных 3D-проекторов. Они проводят на ткани светящиеся зеленые линии в полном соответствии с компьютерной моделью будущего изделия. Такие же проекторы размечают оснастку для правильной выкладки ткани. После выкладки оснастку вместе с тканью помещают в прозрачный герметичный мешок и отвозят в термоинфузионную камеру (печь).

Здесь из мешка откачивается воздух, а затем внутрь мешка всасывается подогретое эпоксидное связующее со специальными добавками (их может быть до 20). Весь цикл нагрева до 180 градусов с последующим охлаждением занимает 8–15 часов, после чего деталь готова к мехобработке. С изделия срезаются неизбежные «наплывы», а 5-координатный фрезерный станок создает все нужные отверстия и углубления.

Достоинства вакуумно-инфузионной технологии в том, что она позволяет производить за один технический передел весьма сложные конструкции, например панель крыла, состоящую из аэродинамической обшивки и составляющего с ней монолитное целое силового набора. При использовании препрегов такое невозможно: весь блок пришлось бы

собирать из отдельных деталей, то есть использовать увеличивающий вес крепеж и закладываться на приличные трудозатраты.

Кроме того, для вакуумно-инфузионной технологии не требуются автоклавы (а автоклав для крупной детали – это значительные деньги). Наконец, препрег имеет ограниченный срок годности (максимум неделю), и если выкладка сложного узла потребует больше времени, вся работа пойдет насмарку. Эти преимущества позволят, как рассчитывают в «Аэрокомпозите», значительно сэкономить на производстве «черного крыла» для МС-21 и добиться тех самых желанных экономических конкурентных преимуществ.

Производство будет организовано на заводе «Аэрокомпозит-Ульяновск» – это одно из ожидающих вскоре ввода в строй серийных предприятий ЗАО «Аэрокомпозит».

#### **С международным размахом.**

Второе предприятие на Волге – «КАПО-Аэрокомпозит». Оно расположилось на территории знаменитого казанского авиазавода КАПО им. Горбунова. К переданным композитному производству старым цеховым площадям (18 000 м<sup>2</sup>) добавилось еще 15 000 м<sup>2</sup> пристроек. В Казани тоже пока продолжается строительство, практически готова лишь «чистая комната» – помещение площадью 6000 м<sup>2</sup>, которое комнатой назвать не поворачивается язык.

Здесь монтируют вентиляцию: нагнетатели, расположенные на потолке, будут подавать воздух в помещение. Воздух прибьет пыль к полу, после чего она попадет в вытяжки, отверстия которых расположены на полу и прикрыты решетками. На потолке уже смонтированы и кронштейны для лазерных проекторов. В «чистой комнате» будет проводиться раскрой ткани и выкладка углепластиковых деталей для элементов механизации крыла – закрылков, спойлеров, элеронов, а также

для хвостового оперения. Казанское предприятие будет работать по традиционной препреговой технологии, зато имеет перспективы на международном рынке.

В 2014 году начнется серийный выпуск (по 24 комплекта элементов крыла в год) для российских самолетов Sukhoi Superjet 100 и MC-21. В том же году при участии партнера – австрийской компании FACC AG – начнется подготовка к производству аналогичных деталей для концернов Boeing и Airbus.

Компания FACC AG – это бывшее аэрокосмическое подразделение известной австрийской фирмы Fischer, знакомой любителям горных лыж и скейтбордов. В настоящее время контрольный пакет FACC AG принадлежит китайскому капиталу, однако компания полностью сохранила свой европейский высокотехнологический потенциал. Именно на мощностях австрийских партнеров «Аэрокомполита» создавались первые уменьшенные прототипы «черного крыла» для MC-21.

Но если «революционная» составляющая композитного производства (вакуумно-инфузионная технология) теперь развивается на отечественной базе в Москве и Ульяновске, то производство деталей механизации по старой доброй автоклавной (препреговой) технологии в Казани может рассматриваться как попытка участия в международном разделении труда.

Сейчас ведутся переговоры о вхождении FACC AG в капитал «КАПО-Аэрокомполит», после чего российское предприятие может рассчитывать на долю в портфеле заказов от крупнейших авиаконцернов мира. В рамках грядущего расширения сотрудничества FACC AG проводит технологический мониторинг производств, создаваемых российскими партнерами, и помогает внедрить западные стандарты контроля за качеством продукции.

Иностранные партнеры, иностранные технологии, иностранные материалы – без всего этого российская композитная революция, разумеется, оказалась бы невозможной: разработка всего своего «с нуля» обернулась бы отставанием навсегда. Однако перспективы постепенной локализации индустрии весьма неплохи: если сейчас авиастроители используют для композитных деталей импортную ткань, то после вступления в строй большого современного предприятия ХК «Композит» в Алабуге, возможно, появится шанс перейти на сырье, произведенное в России.

### УМНАЯ ДОРОГА

Новостные ленты регулярно пестрят сообщениями о том, что где-либо планируется ввести в эксплуатацию «умную» дорогу. Причем под этим термином понимают все что угодно: дороги могут подпитывать автомобили энергией, снабжать водителя информацией, светиться в темноте... Так что же такое «умная» дорога XXI века?

На протяжении мировой истории дороги знали множество покрытий. Камень, щебень, кирпич, дерево, песок, асфальт – эпохи и цивилизации диктовали свои правила строительства. Казалось бы, дорога достигла совершенства – идеально гладкий и прочный асфальт немецких автобанов подходит для любого вида транспорта (не считая, конечно, тяжелых гусеничных машин, которым вообще никакая дорога не нужна). Конечно, по износостойкости асфальт уступает римским булыжникам, но современные технологии позволяют быстро и регулярно его перекладывать: не поступаться же плавностью хода в угоду долговечности!

Как еще можно улучшить дорогу? Какое покрытие станет следующей вехой прогресса? В Ванкувере, например, недавно предложили добавлять в

асфальт частицы переработанного пластика, что увеличивает прочность и позволяет часть дороги при перекладке пускать во вторичное использование. Но это лишь усовершенствование привычного покрытия. Гораздо более интересной идеей кажется наделить дорогу «разумом», заставить ее не просто лежать под колесами, но и работать на человека в прямом смысле этого слова.

### **Солнечные пути.**

Концепций превращения дороги в интерактивную систему существует множество. Рассмотрим несколько основных направлений, в которых движутся инженеры и дизайнеры. Американские инженеры Скотт и Джулия Брюсоу разработали схему, позволяющую превратить дорожную сеть в огромную солнечную электростанцию. Проект получил название Solar Roadways, и суть его достаточно проста. Все дорожное покрытие США Брюсоу предлагают заменить на солнечные батареи, накрытые прозрачным сверхпрочным материалом на основе стекла, способным выдерживать постоянную транспортную нагрузку.

Подобная схема позволит не разгрузить, а попросту сделать ненужными ряд традиционных электростанций – даже при условии, что «на сторону» пойдут только излишки энергии. В первую же очередь Solar Roadways будут питать сами себя. Зимой они будут самоочищаться от снега и льда путем легкого прогрева, дорожные знаки станут интерактивными, управляемыми от дороги, разметку можно будет высвечивать встроенными в полотно светодиодами; более того, от полотна смогут бесконтактно заряжаться аккумуляторы электромобилей!

Скотт и Джулия основали собственную компанию и в феврале 2012 года представили первый образец дорожной плиты, квадрат со стороной 3,658 м. Причем еще до этого проект выглядел настолько убедительно, что



министерство транспорта США выделило грант в \$100 000 на изготовление прототипа.

Покрытие Solar Roadways состоит из трех слоев. Внешний слой – это основная проблема разработчиков. Специальное стекло, которое будет достаточно прочным, чтобы выдерживать даже тяжелые грузовики, не прогибаясь и не повреждая хрупкие солнечные панели, стоит очень дорого. Нельзя также забывать, что покрытие должно быть водонепроницаемым и выдерживать порой очень тяжелые погодные условия.

Второй слой – электронный. Он включает в себя управляющие микропроцессоры, нагревательные элементы для избавления от снега, солнечные панели, LED-подсветку. Наконец, третий слой – базовый, коммуникационный. Именно через него электроэнергия, «добытая» дорогой, поступает внешним потребителям. И кстати, не только электроэнергия. Через Solar Roadways можно вести телефонию, высокоскоростной интернет и т. д.

Плюсы и минусы разработки Брюсоу налицо. Плюсы: дешевая и доступная электроэнергия, огромная автономная электростанция с возможностью подключения к ней в любом месте, удобство управления разметкой и информацией, экологические преимущества. Основной же минус проекта – его чудовищная стоимость. Одна панель по самым скромным расчетам обойдется в \$7–10 тысяч (асфальт такой же площади стоит около \$250), да и надежность системы под большим вопросом. Одно дело – испытание пробного квадрата в тепличных условиях, а другое – ежедневный трафик, дожди, снега, грязь, которая закрывает солнечные панели и не счищается нагревом.

Перспективы у Solar Roadways есть. Скорее всего, сначала их испытают на менее нагруженных участках трасс – например, парковках. А потом уже будут смотреть, стоит ли игра свеч. К слову, систему

поддорожного обогрева Interseasonal Heat Transfer предлагала еще в 2005 году британская компания ICAX Ltd. – их термонакопители должны были собирать избыточное тепло дорожного полотна летом и отдавать его зимой. Проект успешно прошел стадию предварительных испытаний в Хиросиме (Япония), но более о нем ничего слышно не было.

### **Умный хайвей.**

Другой проект интерактивной дороги предложили голландцы из компаний Studio Roosegaarde и Heijmans Infrastructure. Их совместная разработка Smart Highway значительно проще, чем американский вариант, и уже на 2013 год запланирован пуск пробного участка дороги. Голландия – страна небольшая и не очень солнечная, потому батареи под дорогой вряд ли себя окупят, а вот интерактивные свойства полотна вполне могут улучшить организацию дорожного движения, уменьшить аварийность, упростить управление трафиком.

По идее разработчиков, трасса должна заранее предупреждать водителей о нештатных ситуациях, о снегопаде, пробках или авариях, должна быть ярко освещена ночью. Казалось бы, голландцы серьезно проигрывают американцам по функционалу – но нет. Дело в том, что разработчики не собираются полностью менять покрытие уже построенных дорог – наоборот, элементы умной дороги планируется встраивать в существующую сеть, причем элементы эти в большинстве своем очень просты и основываются не на электронике, а на химии.

Флуоресцентные краски и порошки обеспечат ночное свечение (до 10 часов после дневной «зарядки») обычной разметки, а в плохую погоду на дороге будут проявляться предупреждающие узоры, нанесенные другими видами краски, реагирующей на внешние условия. Интерактивная разметка может быть реализована также путем врезки в полотно экранов – но так или иначе, основным покрытием умных голландских дорог

останется старый добрый асфальт, что снимает основную проблему Solar Roadways – необходимость обеспечить прозрачность внешнего слоя полотна.

Smart Highway также сможет подзаряжать аккумуляторы электромобилей посредством индукции, правда, в отличие от американского конкурента, дорога не станет сама вырабатывать энергию, забирая ее из внешней сети, – для этого предназначена специальная «подзарядная» полоса. Помимо нее, электронная система Smart Highway будет включать в себя элементы дорожной инфраструктуры – светофоры, железнодорожные переезды, знаки и информационные щиты.

Сегодня на стадии бета-тестирования находятся пять составляющих «умной» дороги: динамическая разметка, светящиеся в зависимости от времени суток элементы инфраструктуры, интерактивное освещение, полоса подзарядки электромобилей и система, подразумевающая установку по обочинам множества мелких ветрогенераторов, улавливающих потоки от проезжающих автомобилей. Голландский концепт гораздо дешевле и ближе к реальности, нежели американский, и вполне воплотим в Европе – недаром он получил премию Dutch Design Awards 2012 и готов к частичной реализации.

### **А что же пешеход?**

Итак, с энергетической составляющей и обеспечением безопасности водителя мы разобрались. Но пешеход – тоже участник дорожного движения, причем он изначально находится в более опасной ситуации, нежели автомобилист. Проектов, приспособляющих дорогу для пешехода, довольно много, и все они базируются на общем принципе, который хорошо сформулировал известный российский дизайнер Артемий Лебедев: для уменьшения количества аварий на переходах нужно выделять и подсвечивать не знак перехода, а идущего через дорогу человека.

Собственно, студия Лебедева несколько лет назад предложила концепт «Воздушная зебра». В соответствии с проектом, над «зеброй» протягивается система фонарей, по форме дублирующих разметку. Таким образом, необходимость в знаке практически отпадает: переход и пешеход ярко освещены, видны издалека, причем даже когда сама «зебра» не видна из-за снега или грязи, ее верхний «дублер» продолжает работать.

В 2012 году южнокорейский дизайнер Ходжон Лим создал другой концепт «умного перехода» – Guardian, чуть более сложный в реализации, но тоже вполне наглядный. По идее Лима, зона перехода ограничивается четырьмя столбиками, в каждый из которых встроены генераторы лазерного луча. Когда дорога открыта для перехода, красные лучи визуально «отсекают» автомобили, служа заметным (пусть и нематериальным) шлагбаумом. Когда же красный горит пешеходам, луч точно так же отгораживает от людей проезжую часть. Лучи будут видны и в темноте. Идея неплоха, поскольку работает на уровне психологии: возможно, кто-то не побежит на красный, если перед ним на уровне груди будет «висеть» красная линия, и тем самым спасет себе жизнь.

Впрочем, еще за три года до Лима подозрительно схожий концепт предлагал другой южнокореец Ханьонг Ли. По его идее, лазерная «стена» – а не тонкая линия – появлялась только перед автомобилями. Стена Ли должна быть интерактивной, по ней ходят образованные лазерными лучами красные фигурки пешеходов. В первую очередь стена предназначена для того, чтобы обострить внимание водителей. Правда, стоимость концепта слишком велика по сравнению с его невысокой функциональностью – в этом плане обычная подсветка Лебедева или тонкие красные линии Лима предпочтительнее.

В принципе, подобных концептов было множество – вплоть до «умной» подсветки каждого пешехода индивидуально (причем идущих на

зеленый – зеленым, а на красный – ярко-красным). Объективно говоря, лишь два первых из описанных в этой главе имеют шанс на воплощение в реальности. Суть в том, что современные технологии вполне позволяют просто и недорого обозначить пешехода на дороге, а придумывать для этого сложный и дорогой велосипед – алогично. Так что есть надежда, что мы увидим «Воздушные зебры» или Guardian на наших дорогах.

### **Дела российские.**

В России, как известно, ситуация с дорогами очень тяжелая – в целых регионах их практически нет, а 1235-километровая федеральная трасса А-360 «Лена» вообще вошла в народный фольклор как одна из самых страшных и опасных дорог в мире.

Тем не менее параллельно с разговорами о реставрации обычной дорожной сети ведется речь и о появлении у нас элементов интерактивных дорог. В частности, не так давно ОАО «Роснано» заявило о строительстве в Татарстане пробных участков дороги по голландскому образцу Smart Highway. Светодиодное освещение, люминесцентная разметка, специально разработанное покрытие (армированный стальной стружкой фибробетон, базальтопластиковая арматура, модификаторы асфальтобетонных смесей) – все это теоретически может появиться в районе

Казани уже в 2014 году, но теория у нас, как известно, нередко расходится с реальностью. В Москве же рассматриваются проекты по улучшению пешеходных переходов – в списке изучаемых инноваций и «Воздушная зебра», и разработки южнокорейских дизайнеров.

Пока планируется сделать несколько пробных переходов на отдельных участках и посмотреть, какая от этого будет польза.

В целом, мир готов к принятию интерактивных дорог. Технологии позволяют разместить под дорожным покрытием солнечные батареи, связать разметку с дорожными знаками в единую сеть и даже превратить

трассу в один большой интерактивный экран. Вопрос в первую очередь в стоимости и целесообразности подобных проектов. Если голландцы реализуют Smart Highway и проведут «полевые» испытания, будет о чем говорить.