



Тепловыделяющие  
элементы (ТВЭЛы), готовые  
к использованию на АЭС  
«Дукованы» в Чехии. Как  
правило, ТВЭЛы имеют  
цилиндрическую форму.

# ПЕРЕАТАТЬ ПРЕАКТОР

ЭНЕРГЕТИКА

Новейшие виды топлива способны повысить безопасность и экономические показатели атомных электростанций

*Род Маккаллум*

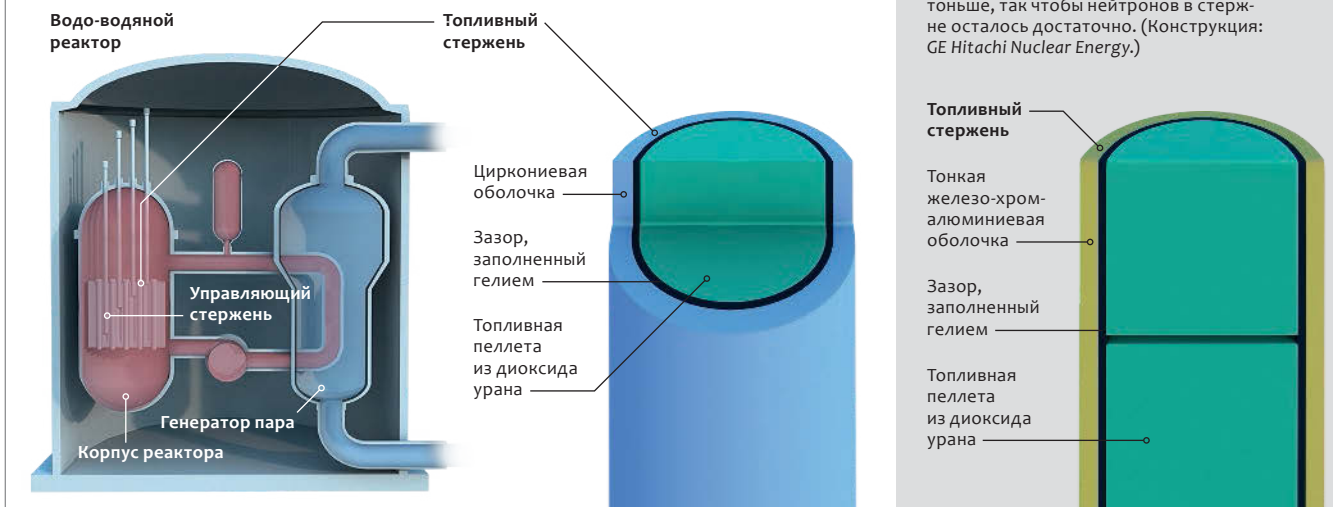


## ОБ АВТОРЕ

**Род Маккаллум** (Rod McCullum) — руководитель Отдела по прекращению эксплуатации и использования топливных элементов в Институте атомной энергии в Вашингтоне. Работал в инженерной компании Stone & Webster Управления по атомной энергии США и на трех атомных электростанциях.

## Новые топливные элементы для реакторов

Производители испытывают так называемые устойчивые к авариям топливные элементы. При перегреве они с гораздо меньшей вероятностью придут в состояние, способное привести к взрыву и выбросу радиации, как это случилось при аварии 2011 г. на АЭС «Фукусима-1» в Японии. Почти на всех атомных электростанциях используются реакторы с водой под давлением («водо-водяные», на илл.) или кипящие реакторы. Ядерное деление происходит в топливных таблетках — пеллетах, помещенных в топливные стержни, покрытые специальной оболочкой; пеллеты уложены неплотно, с зазором, обеспечивающим их тепловое расширение при работе. Четыре представленных здесь устойчивых к авариям твэла расположены в порядке возрастания отличий от ныне принятой компоновки. Каждый из производителей работает над несколькими вариантами.



### Новая оболочка

Для производства электроэнергии раскаленные топливные стержни внутри любого реактора превращают воду в перегретый пар. В стандартном стержне с пеллетами, сделанном из плакированного циркониевого сплава, нейтроны, образовавшиеся при делении ядер, обеспечивают самоподдерживающуюся ядерную реакцию. Но если цирконий перегреется, он вступит в реакцию с водой или паром; при этом образуется газообразный водород, а он может вырваться наружу и взорваться. Плакированная оболочка из железа, хрома и алюминия не реагирует. Она поглотит часть нейтронов, но ее можно сделать тоньше, так чтобы нейтронов в стержне осталось достаточно. (Конструкция: GE Hitachi Nuclear Energy.)

### Топливный стержень

Тонкая железо-хром-алюминиевая оболочка

Зазор, заполненный гелием

Топливная пеллета из диоксида урана

## ИНЖЕНЕРЫ СОЗДАЮТ

новые конструкции урановых стержней, используемых почти во всех атомных реакторах по всему миру, с тем чтобы снизить вероятность как взрыва водорода, так и выброса радиации при аварии — как это случилось в 2011 г. в Японии, на атомной электростанции «Фукусима-1». Новые топливные элементы еще не доведены до совершенства, но их испытания уже начались.

В активной зоне реактора атомы урана делятся, высвобождая нейтроны и тепло. Системы внутри и вокруг реактора предохраняют активную зону от перегрева. Усовершенствование топливных стержней, чтобы они с меньшей вероятностью плавилась или ломались при перегреве и с меньшей вероятностью вырабатывали водород, снизит риск выброса радиоактивных веществ в случае аварии. Эти же усовершенствования должны способствовать тому, что атомная электростанция станет эффективной и будет вырабатывать электричество на конкурентной основе.

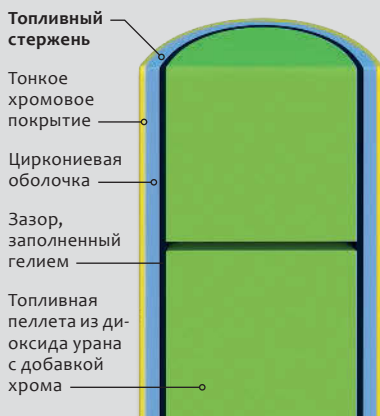
Во всех реакторах, работавших в США в 1998 г., независимо от их конструкции использовалось урановое топливо, запрессованное в цилиндрические керамические пеллеты размером с ластики на конце карандаша. Пеллеты уложены внутри длинных топливных стержней из циркониевого

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- На протяжении многих десятков лет топливные элементы для атомных реакторов по всему миру остаются практически неизменными.
- Четыре новые конструкции могут сделать активную зону реактора безопаснее и эффективнее.
- Компании испытывают новые материалы, а надзорные органы разрабатывают новые правила их применения.

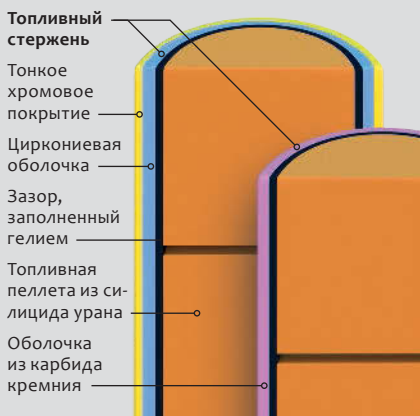
### Добавить хром

Если покрыть циркониевую оболочку тонким слоем хрома, то он предотвратит реакцию между материалом оболочки и водой, а также образование водорода — подобно тому, как антикоррозийное покрытие защищает металл от ржавчины. Оболочка с покрытием выдерживает более высокую температуру и прослужит дольше. Кроме того, добавка хрома в пеллеты с диоксидом урана поможет защитить их от разрушения или деформирования под воздействием тепла, то есть сделает весь топливный стержень стойким в аварийных условиях и снизит вероятность выброса радиоактивного вещества. (Конструкция: *Framatome*.)



### Ввести кремний

Замена материала пеллеты с диоксида урана на силицид урана обеспечит передачу окружающей воде большего количества тепла. Значит, твэл сможет работать при более низкой температуре, и это сделает образование водорода и выброс радиации при аварии менее вероятными. Для снижения вероятности образования водорода циркониевую оболочку можно либо покрыть хромом (слева), либо заменить карбидом кремния, который не вступает в реакцию с водой и меньше подвержен тепловому разрушению или деформации, еще более снижая риск аварии (справа). (Конструкция: *Westinghouse Electric Company*.)



### Изогнуть стержень

Решительное изменение конструкции — отказ от пеллеты. Топливный элемент из цирконата урана покрыт циркониевой оболочкой; у обоих материалов одинаковое объемное расширение, так что зазор не нужен. Плавленный топливный элемент вместе с оболочкой изогнут, так что образуется твердый стержень с большей поверхностью, с которой и передается тепло воде. (Поплавок помогает равномерно распределять энергию.) При столь высоком уровне теплообмена топливный элемент работает при более низкой температуре, что предотвращает перегрев и делает аварию менее вероятной. Уран придется обогащать до 20% вместо 5%, достаточных для других представленных здесь топливных элементов. (Конструкция: *Lightbridge*.)



сплава, а стержни погружены в воду. Во время реакции деления нейтроны, высвободившиеся из топливных пеллет, легко проходят сквозь цирконий и проникают в соседние топливные стержни — так поддерживается цепная реакция, вырабатывающая тепло. Тепло превращает воду в перегретый пар, а он вращает турбины, вырабатывающие электричество.

В течение многих лет цирконий использовали для производства топливных стержней именно потому, что он проницаем для нейтронов. Имелось в виду, что разведка урана, его добыча, обработка и обогащение (увеличение в нем доли изотопа урана  $U235$ , способного поддерживать цепную реакцию) очень сложны и дороги. А наука о том, как скомпоновать активную зону реактора таким образом, чтобы оптимизировать выход энергии, была молода. Считалось, что нейтроны слишком ценны, их нельзя терять. Но авария на АЭС «Фукусима-1» показала — прямо на экранах телевизоров, — что если цирконий перегреется, то он может реагировать с водой (или паром), а это приводит к образованию потенциально взрывоопасного водорода.

Конструкция и работа современных реакторов гораздо сложнее; доказано, что урана в мире

достаточно и что его обогащение несложно, так что операторы атомных электростанций могут позволить себе пожертвовать несколькими нейтронами. В результате ученые и инженеры разрабатывают совершенные альтернативные конструкции, которые сводят к минимуму образование водорода и выдерживают высокие температуры.

Обеспокоенные аварией на АЭС «Фукусима-1», производители оборудования, работая совместно с Министерством энергетики США, готовы перейти на четыре топливных элемента, устойчивых к авариям, причем к каждому применяется особый подход. А поскольку все их можно устанавливать в существующие реакторы с минимальной модернизацией оборудования или вовсе без нее, то их использование в ныне действующих реакторах начнется уже в 2020-х гг.

Три конкурирующие компании, которые уже производят новые топливные стержни в промышленных масштабах, — *Framatome*, *GE Hitachi Nuclear Energy* и *Westinghouse Electric Company* — начали испытывать некоторые в существующих реакторах. Конструкторов вдохновляют новые идеи: снизить вероятность проблемных реакций циркония, покрыв его оболочкой, заменив его либо используя другие ингредиенты топливных пеллет.

Четвертая идея, с которой выступил *Lightbridge*, новый игрок на рынке США, — объединить уран и цирконий в единый, менее реактивный сплав, сформировав его подобно пастилке от кашля, — конфигурация, обеспечивающая наилучший теплоперенос. Уран нужно будет обогащать до более высокого уровня, чем это допускается ныне, так что придется изменить действующее законодательство США.

В течение десятилетий владельцы атомных электростанций не могли добиться нормативного утверждения любых топливных элементов нового типа, но они пытаются снова и снова, так как вынуждены конкурировать с недорогим природным газом и все шире применяемой солнечной и ветровой энергией. В разработке и производстве этим службам помогает обширная инфраструктура ядерных исследований и разработок — Национальные лаборатории. И эта деятельность быстро становится глобальной. В июле 2018 г. ученые

## Если устойчивые к авариям твэлы зарекомендуют себя хорошо, атомная энергия может поймать момент в Японии, где продолжаются дебаты о том, какая часть «флота» национальных реакторов может снова «поднять паруса»

из США и Европейского союза провели в Национальной лаборатории штата Айдахо семинар-дискуссию о том, как оптимизировать совместную деятельность на обоих континентах. Организация по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР) разрабатывает структуру для испытаний новых топливных элементов. Если устойчивые к авариям твэлы зарекомендуют себя хорошо, атомная энергия может поймать момент в Японии, где продолжаются дебаты о том, какая часть «флота» национальных реакторов может снова «поднять паруса».

Конечно, придется преодолеть значительные препятствия. Прежде чем новые топливные элементы будут готовы к коммерческому использованию, предстоит значительный объем испытаний небольших количеств топлива внутри топливных стержней, компьютерное моделирование работы твэлов как при нормальной работе, так

и в аварийных условиях. Скептики из промышленности должны будут убедиться, что новые материалы ведут себя именно так, как было заявлено. Чтобы поддержать эти усилия, на передний план выдвигается новейшая техника моделирования. Технологии моделирования, разработанные в Консорциуме Министерства энергетики США по усовершенствованному моделированию легководных реакторов на базе Национальной лаборатории в Ок-Ридже, штат Теннесси, могут значительно ускорить фундаментальные исследования, инженерные разработки и коммерциализацию.

Если результаты испытаний окажутся удовлетворительными, то всей цепочке снабжения топливными элементами США — от производственного цеха до загрузочной площадки реактора — придется обновиться, чтобы реорганизовать все процессы и процедуры на атомной электростанции. И каждый шаг должен удовлетворять соответствующим правилам.

Размышления о новых топливных элементах могут оказаться лишь началом еще более значительных перемен. Ученые и инженеры разрабатывают высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, в которых будут использованы частицы урана, заключенные в экзотические оболочки; пеллеты, похожие на шарики жевательной резинки, будут сами управлять атомным реактором вместо управляющих стержней, обычно размещаемых между топливными стержнями. На подходе и реакторы на расплавленной соли, в которых топливо и охладитель можно объединить, создав тем самым простой механизм, предотвращающий перегрев.

Отрасли промышленности, поставляющие природный газ, солнечную и ветровую энергию, в последние годы значительно изменились. Такие же изменения должны произойти и в атомной промышленности. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Гиббс У. Ядерный синтез: малые игроки // ВМН, № 1–2, 2017.
- Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled Reactors. International Atomic Energy Agency, October 2010.
- Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors. International Atomic Energy Agency, June 2016.