

**УДК 504.05; 614.8; 536.24; 621.039.546**

Кузнецов М.В., д.х.н., главный научный сотрудник  
 ФГБУ ВНИИ по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных  
 ситуаций (федеральный центр науки и высоких технологий) МЧС России

Kuznetsov MV, D. Sci. (Chemistry), Principal Researcher  
 All-Russian Research Institute on Problems of Civil Defense and Emergencies of  
 Emergency Control Ministry of Russia (EMERCOM)

**ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И  
 УМЕНЬШЕНИЕ РИСКА ВОЗНИКОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ  
 СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМК ЗА  
 СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
 ОСОБЕННОСТЕЙ ТВЭЛ**

**INCREASING THE LEVEL OF RADIATION SAFETY AND  
 REDUCING THE RISK OF EMERGENCIES DURING THE  
 OPERATION OF RBMK-TYPE REACTORS THROUGH THE USE OF  
 NEW DESIGN FEATURES OF FUEL RODS**

Важное место в развитии мировой энергетики занимает проблема безопасной эксплуатации атомных теплоэлектростанций. Достаточно большое внимание в настоящее время уделяется усовершенствованию аварийной системы ядерных реакторов одноконтурных парогенерирующих установок путем поиска конструктивного оформления тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОв), обеспечивающего повышение уровня безопасности этих энергетических систем и позволяющего увеличить предельно допустимые тепловые нагрузки на единицу массы заложенного в ТВЭЛ ядерного топлива. Основной ориентир делается на условия работы ТВЭЛОв в тепловых парогенерирующих системах прямого действия, без промежуточного теплоносителя.

В российской и мировой атомной энергетике такие энергетические реакторы исключительно мирного назначения широко распространены; по Российской номенклатуре они относятся к классу РБМК. Кроме того, реакторы названного типа находятся в режиме полностью открытого доступа по всем конструктивным и режимным параметрам. В настоящее время в Российской Федерации всё еще в эксплуатации находятся 10 реакторов типа РБМК. В связи с этим актуальным остается вопрос усовершенствования конструкции реакторов данного типа и повышения уровня их защищенности от чрезвычайных ситуаций и разного рода внешних вмешательств, включая террористические акты.

По поводу причин аварии четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС всё ещё нет единого мнения специалистов и экспертов. В официальных заключениях приводятся различные версии события, в частности: несоответствие конструкции реактора нормам безопасности; дефекты конструкции стержней («концевой эффект»); некий «скакок мощности» необъяснимой природы; кавитация насосов; упоминается даже локальное землетрясение. Однако, практически, все специалисты сходятся во мнении о том, что разрушающая фаза аварии началась с того, что от перегрева ядерного топлива разрушились тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Нами рассмотрены альтернативные версии обозначенных техногенных катастроф в ядерных установках, построенные на привлечении механизма явления «парового взрыва» для описания условий возникновения и динамики развития этих масштабных аварийных ситуаций. Отметим, что понятие «паровой взрыв» возникло в науке и инженерной практике более полутора столетий назад с наступления века паровых двигателей: перегретая водная среда в котле, работающем при высоком давлении, в случае аварийного сброса давления мгновенно вскипала, что приводило к формированию разрушающей аппарат ударной волны, сопровождавшейся к тому же трагическими последствиями.

Для описания механизма, условий инициирования и динамики развития Чернобыльской катастрофы мы привлекаем понятие «кризиса кипения» хорошо известное всем, кто занимается разработкой и проектированием атомных энергетических паропроизводящих станций (например, реакторов типа РБМК). В современных ядерных реакторах РБМК, как правило, используются стержневые ТВЭЛы с источником тепловой энергии в виде таблеток с низким содержанием диоксида урана ( $UO_2$ ). Они загружаются в трубчатую (цилиндрическую) оболочку из стали или сплава циркония однородно по всей длине (так называемая - однородная сборка уложенных друг на друга таблеток ядерного топлива). Энергия, выделяющаяся внутри ТВЭЛОв, отводится обтекающим ТВЭЛы водным теплоносителем. «Кризис кипения» – это спонтанный переход из штатного режима «пузырькового кипения» в аварийный режим «пленоочного кипения». В штатном режиме парообразования («пузырьковый режим») температура на поверхности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОв) не превышает 150-2000С. Если снимаемая мощность превысит некоторое предельное значение, то на поверхности ТВЭЛА образуется сплошная паровая пленка, интенсивность теплоотдачи ухудшается на порядок, и, следовательно, на порядок возрастает разогрев ТВЭЛА. ТВЭЛ разрушается, урановое топливо разбрасывается по водному объему реактора, водная среда быстро перегревается много выше температуры кипения, в результате чего происходит взрывное вскипание (т.е. «паровой взрыв») и разрушение реактора. Нами рассматривается наиболее опасный с точки зрения возможности возникновения аварийной

ситуации режим перехода от однофазной конвективной передачи тепла от поверхности ТВЭЛа (зона недогретой до температуры кипения рабочей водной среды) к режиму приповерхностного кипения. При данном режиме температурное поле в рабочей среде у поверхности ТВЭЛа теряет устойчивость, в результате чего процесс теплоотдачи в локальной области становится нестационарным. Это явление обусловлено формированием в пограничном между жидкостью и поверхностью ТВЭЛа слое циклически повторяющейся картины сменяющих друг друга фазовых состояний: I – прогрев приповерхностной пленки жидкости до температур, превышающих температуры ее кипения; II – распад данного метастабильного состояния в режиме «взрывного» вскипания, т.е. в режиме циклически повторяющихся вдоль поверхности ТВЭЛа актов «паровых взрывов». Процесс распада перегретой жидкой пленки (акт «парового взрыва») по своей физической сути аналогичен детонационному процессу. От классической детонации он отличается лишь низкой энергетикой «топлива» и его малой массой. Описанный режим назван режимом «детонационного кипения». Достоверным признаком вхождения ТВЭЛа в этот режим является его сопровождение акустическим эффектом – появление интенсивной акустической эмиссии. Как и в любом взрыве детонационной природы, стадии распада приповерхностного перегретого слоя жидкости сопровождаются генерацией локализованных у поверхности ТВЭЛОв ударных волн и кавитационных явлений, которые приводят к ускоренному разрушению оболочек ТВЭЛОв и интенсивному накипеобразованию. Процесс «детонационного кипения» может достаточно эффективно способствовать деструкции жидкостей, чувствительных к механохимическому или звукохимическому воздействию, а также приводить к накипеобразованию на поверхностях ТВЭЛа в водных парогенерирующих установках. Воздействие собственно взрывного процесса на структуру ТВЭЛОв можно представить в следующем виде. Взрывообразное разрушение перегретой водяной пленки у поверхности ТВЭЛ сопровождается химической активацией «косколков» как самой рабочей жидкости, так и содержащихся в ней солей. Именно это приводит к осаждению на поверхностях ТВЭЛОв содержащихся в воде солевых примесей, активированных паровым взрывом. Отложения прочно связываются с поверхностями ТВЭЛОв, преодолевая адгезионные барьеры и уплотняясь под влиянием постоянно имеющих место в приповерхностных слоях ударно-волновых воздействий. Относительно местоположения зон интенсивного отложения накипи на поверхностях тепловоспринимающих коллекторов котельных установок. Накипью застает не те зоны коллекторов, в которых реализуется процесс развитого объемного кипения воды и где, казалось бы, обеспечиваются наиболее благоприятные условия для выделения солей по классическому механизму пересыщения раствора. Ею застает коллекторный тракт,

находящийся в зоне приповерхностного кипения холодной жидкости, то есть именно в той части, в которой формируется режим «детонационного кипения». Явление «кризиса кипения» накладывает жесткие ограничения на предельно допустимую удельную тепловую нагрузку, принимаемую за основу при проектировании ядерных реакторов названного типа.

Для проверки справедливости представлений о механизмах образования накипи нами были экспериментально смоделированы процессы накипеобразования. В частности, в качестве модельной жидкой среды в экспериментах использовались низко концентрированные водные растворы комплексных солей металлов платиновой группы, а в роли модели ТВЭЛа был применен электронагреваемый стальной проволочный элемент. При реализации режима «детонационного кипения» в слабых водных растворах комплексных солей на поверхности нагревателя наблюдалось интенсивное выпадение осадка в виде металлической платины (или палладия), то есть образовывалась «платиновая накипь». Платиновая фаза высаживалась только на поверхности ТВЭЛОв, то есть реакция деструкции соли реализовывалась только в узком приповерхностном слое жидкости, в котором процесс кипения связан с генерацией детонационных эффектов. Сам же раствор оставался прозрачной гомогенной средой, а в его объеме не наблюдалось даже признаков разложения и появления дисперсной фазы металла. При фиксированной тепловой нагрузке осадок нарастал по четко выраженному линейному закону в зависимости от времени обработки ТВЭЛа детонационным кипением. При поиске способов подавления процесса накипеобразования, торможение этого процесса может быть достигнуто путем целенаправленного подбора присадок, снижающих уровень «предвзрывного» перегрева приповерхностного слоя рабочей жидкости. Вместе с тем, обнаруженные нами интенсивные процессы осаждения металлической фазы на поверхностях ТВЭЛОв в условиях «детонационного кипения» следует рассматривать также и с позитивной в практическом отношении точки зрения, так как это может оказаться новым эффективным инструментом для формирования каталитически активных покрытий на металлических и керамических подложках.

Существенным недостатком используемой в настоящее время гомогенной загрузки ТВЭЛОв с однородным и равномерным по всей длине энерговыделением (а именно такая схема загрузки ТВЭЛОв повсеместно применяется в мировой практике) является неустойчивость штатного теплового режима их работы. То есть, имеет место неустойчивость режима кипения жидкого теплоносителя (в нашем случае, водного) по отношению к возмущениям, случайно возникающим на локализованном участке ТВЭЛА. Именно такие возмущения и могут вызывать в возмущенной зоне спонтанный переход нормального (штатного) теплового режима работы ТВЭЛА (соответствующего пузырьковому кипению рабочей жидкой

среды) в аварийный высокотемпературный режим пленочного кипения, который затем распространяется по всей длине ТВЭЛА. Как итог проведенной экспериментальной работы предлагаются ТВЭЛы для паропроизводящих энергетических установок типа РБМК, в которых источник энергии имеет периодическую структуру загрузки ядерного топлива, чередующегося с инертным балластом (например, в виде термостойкой оксидной керамики или металлических элементов).

Целью внедрения в реальную эксплуатационную практику предлагаемой новой конструкции ТВЭлов является:

- снижение опасности возникновения взрывоопасных ситуаций в процессе эксплуатации ядерных энергетических установок в результате потери устойчивости режима парогенерации на ТВЭЛЕ, сопровождающейся его катастрофическим перегревом и, как следствие, разрушением ТВЭЛА;

- повышение устойчивости процесса парогенерации на ТВЭЛЕ к локальным возмущениям, вызванным сбоями в системах управления реакторами или другими случайными факторами;

- увеличение максимально допустимого значения съема энергии с единицы массы ядерного топлива, загруженного в ТВЭЛ, с целью подъема уровня безопасности («запаса прочности») ядерного реактора;

- повышение общего уровня защищенности реакторов типа РБМК от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также различного рода внешних вмешательств, в том числе террористических актов.

В дальнейшем планируется провести исследование предлагаемой схемы загрузки ядерного топлива на примере электрической модели ТВЭЛА. Такой модельный ТВЭЛ должен изготавливаться в форме линейного стержневого или проволочного электронагревателя, помещенного в водную рабочую среду. При этом модельный ТВЭЛ состоит из чередующихся активных по интенсивности тепловыделения зон (фрагменты из проволоки с высоким сопротивлением, например, изготовленные из сплавов Ni-Cr или Fe-Cr-Al) и пассивных (низкоомные проволочные фрагменты, например, изготовленные из Cu или Ag). Расчеты, проводимые на базе теоретической модели, и экспериментальное моделирование предлагаемой конструкции позволят разработать практические рекомендации для дальнейшего использования в ядерных реакторах ТВЭлов нового типа, предлагаемого нами. Результаты, полученные на предварительном этапе проработки концепции, подтвердили преимущества по уровню безопасности предлагаемого ТВЭЛА с периодическим по его длине размещением источника тепловой энергии перед ТВЭЛОм с однородным (равномерным по всей длине) энерговыделением, а именно: предельно допустимая тепловая мощность, при которой самопроизвольно возникает аварийное высокотемпературное

состояние пленочного кипения, может быть увеличена на 30-40%; мощность, при которой локальное возмущение может инициировать пленочный режим, возрастет более чем на 50%.

Таким образом, по нашему мнению, именно паровой взрыв, обусловленный различными причинами, привели к разрушительной катастрофе техногенного характера, имевшей место на Чернобыльской АЭС. Предотвращение такого рода явлений в будущем должно стать одной из приоритетных задач при конструировании и эксплуатации объектов ядерной энергетики. С этой целью необходимо развитие теоретических представлений о природе паровых взрывов, создание моделей процессов, протекающих в реальных условиях, а также практическое внедрение полученных результатов с целью повышения уровня защищенности реакторов типа РБМК от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также любые внешние вмешательства антропогенного характера, включая террористические акты.