

**ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ ИСХОДНОГО АВАРИЙНОГО СОБЫТИЯ  
ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ**

Представлены результаты комплексного анализа проблемных теплофизических аспектов определения начала кипения теплоносителя, которое явилось исходным аварийным событием Чернобыльской катастрофы. Рассмотрен характер взаимосвязи теплогидравлических и нейтронно-физических процессов, которые произошли в нижней части активной зоны реактора непосредственно перед ядерной катастрофой. Критически проанализированы известные методы диагностики и контроля процессов генерации паровой фазы в водоохлаждаемых реакторах. Проанализированы задачи разработки диагностической системы нового поколения на основе интеллектуального программного обеспечения.

*Ключевые слова:* Чернобыльская катастрофа, исходное аварийное событие, теплофизические проблемы.

История атомной энергетики неопровержимо свидетельствует о том, что именно недостаток знаний в области теплообмена на поверхности ТВЭЛ, а также процессов гидродинамики двухфазного теплоносителя, которые протекают в реакторных каналах, в большинстве случаев является наиболее частой причиной возникновения и развития тяжелых аварий на АЭС. Не является исключением и Чернобыльская катастрофа. В настоящее время можно считать окончательно установленным, что исходным аварийным событием, которое инициировало последовавший за ним разгон на мгновенных нейтронах канального водоохлаждаемого графитового ядерного реактора (ЯР) типа РБМК-1000, стало неконтролируемое штатными техническими средствами систем внутриреакторного контроля (СВРК), непредусмотренное на этапе проектирования исполнительных органов системы управления и защиты (СУЗ), надежно неопределяемое расчетным путем и, таким образом, неизвестное оперативному персоналу энергоблока начало кипения (НК) в нижней части активной зоны (АкЗ) этого реактора. В связи с изложенным следует подчеркнуть тот факт, что и сегодня, по прошествии трех десятилетий, минувших после заprojektной аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС, определяющие теплофизические проблемы зарождения и катастрофического развития исходного аварийного теплогидравлического события, которым явилось именно НК теплоносителя на поверхности ТВЭЛ, продолжают оставаться практически неизвестными, имеют проблемный характер и фактически не могут быть решены на основе существующих подходов. Системному анализу комплекса вышеуказанных вопросов безопасности водоохлаждаемых ЯР и посвящена настоящая статья.

В контексте изложенного заслуживающим особого внимания является тот факт, что вышеуказанное исходное аварийное событие произошло в течение первых пяти секунд с момента начала движения поглощающих стержней при срабатывании аварийной защиты АЗ-5, задействованной с целью останова ЯР. Результатом последовавшего за вскипанием теплоносителя заprojektного развития аварийного переходного процесса и стали следующие, стремительно развивавшиеся в течение первых десятков секунд, начальные этапы Чернобыльской ядерной катастрофы: а) разгон реактора на мгновенных нейтронах; б) кризис теплоотдачи 2-го рода на поверхности ТВЭЛ; в) пароциркониевая реакция; г) водородный взрыв и разрушение всего реакторного отделения. Как известно [1], реакторные установки (РУ) типа РБМК, в особенности первого поколения (реакторы именно этого поколения были установлены на энергоблоках ЧАЭС), характеризуются высоким значением положительного парового коэффициента реактивности (до  $5b_{эф}$ ), недопустимым с точки зрения обеспечения ядерной безопасности. Известно также, что непосредственно перед аварией на 4-м энергоблоке его РУ находилась в нерегламентном, причем чрезвычайно уязвимом для ее безопасности состоянии. Это состояние характеризовалось: а) недостаточным оперативным запасом реактивности, составлявшим 8 стержней вместо минимально допустимых 30 (такой регламент, однако, был введен уже после аварии); б) близким к нулевому входным недогревом теплоносителя, что благоприятствовало его быстрому вскипанию при перемещении в нижнюю часть АкЗ графитовых вытеснителей стержней СУЗ; в) потенциально опасным для ЯР РБМК низким уровнем тепловой мощности (6 - 7 % от номинала).

Следует подчеркнуть, что именно не предусмотренный регламентом эксплуатации предаварийный теплофизический процесс в РУ (НК теплоносителя при срабатывании АЗ-5), в сочетании с неблагоприятными ядерно-физическими условиями и эксплуатационными характеристиками РБМК-1000, стал исходным событием наиболее тяжелой из имевших место в атомной энергетике катастроф.

© И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский, 2016

В контексте изложенного необходимо отметить следующее. Помимо реакторов РБМК важным с точки зрения обеспечения эксплуатационной безопасности ядерных энергоблоков теплофизическим процессом в охлаждаемых жидким теплоносителем энергетических реакторах типа ВВЭР и в ЯР на быстрых нейтронах типа БН также является НК теплоносителя на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ. Наряду с необходимостью надежного расчетного определения этого режима в ряде случаев эксплуатационному персоналу ядерного энергоблока необходима диагностическая информация не только о факте НК в конкретной части АкЗ ЯР, но также и оперативные данные о положении (аксиальной координате) сечения закипания теплоносителя по высоте соответствующей тепловыделяющей сборки (ТВС). Эти данные необходимы не только для оценки распределения паросодержания и коэффициента реактивности по высоте парогенерирующего канала (ПК), но также и для обеспечения возможности контроля за рядом эксплуатационных параметров, важных для безопасности РУ, таких, например, как запас до кризиса теплоотдачи в ТВС. Кроме того, для оптимального проектирования АкЗ, а также обеспечения современных стандартов безопасности для действующих и перспективных образцов ядерных энергоустановок (ЯЭУ) с ЯР некипящего и кипящего типов, при теплогидравлических расчетах необходимы надежные, экспериментально подтвержденные и обоснованные сведения о величине плотности теплового потока  $q_{н.к.}$ , соответствующей режиму НК и соотносящейся с нижней границей пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока в кипящем канале. Очевидно также, что эти данные важны и для оценки гидравлического сопротивления на экономайзерном и кипящем участках ПК.

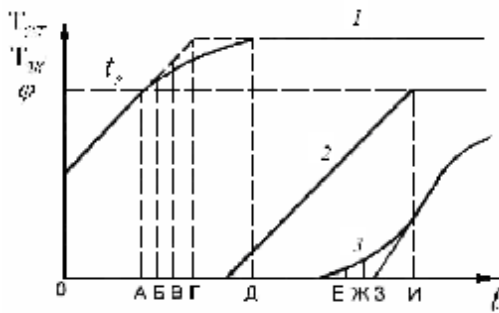
Известно [2, 3 и др.], что потенциальная опасность неконтролируемого перехода режима теплосъема в АкЗ ВВЭР от конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ сначала к пузырьковому кипению, а затем и к его пленочной форме (к кризису теплоотдачи 1-го рода) обуславливает необходимость обнаружения НК. Вместе с тем нельзя не отметить и материаловедческий аспект проблемы обнаружения вскипания теплоносителя в водоохлаждаемых ЯР. Как свидетельствует ряд экспериментальных исследований, причиной разрушения оболочек ТВЭЛ в области НК могут стать усталостные напряжения, возникающие в их материале при температурных пульсациях, которые связаны с испарением микрослоя в основании парового пузыря [4 - 6]. Так, например, в работе [7] было установлено, что в области начала пузырькового кипения на теплоотдающей поверхности возникают пульсации температуры стенки определенной частоты и амплитуды, зависящие от плотности теплового потока  $q$ , массовой скорости  $\Gamma w$  двухфазного потока теплоносителя, а также от длины кипящего участка. Проведенные исследования показали, что при фиксированной массовой скорости потока частота этих пульсаций тем выше, чем больше плотность теплового потока. Кроме того, существует предположение о том, что сокращение эксплуатационного ресурса кипящей поверхности нагрева в области НК является следствием разрушения на ней защитных гидроокисных пленок, что обусловлено действием микрогидравлических ударов, возникающих при деградации паровых пузырей в условиях недогретого кипения. Это также подтверждается в ряде работ, где в области перехода от конвекции к развитому кипению обнаружено разрушение теплоотдающей поверхности теплового имитатора ТВЭЛ в условиях, когда запас до критической плотности теплового потока (КТП) был еще весьма значителен.

В контексте задач, связанных с важным для безопасности требованием оперативного определения режима НК в АкЗ энергетических ЯР, представляется необходимым выполнить анализ существующих подходов к определению НК на поверхности ТВЭЛ и использования эмпирических расчетных зависимостей, которые обычно применяются для расчетного определения этого важного эксплуатационного параметра.

Однако прежде следует подчеркнуть, что практическое использование рассматриваемых ниже эмпирических зависимостей для определения  $q_{н.к.}$  в практике эксплуатации РУ наталкивается на ряд нерешенных проблем. Последние связаны в первую очередь с невозможностью контроля в условиях реальных АкЗ ряда важнейших расчетных параметров (например, величины  $\Gamma w$  в характерных теплогидравлических ячейках ТВС ЯР). Вполне очевидно, что при отсутствии надежной оперативной информации об этих параметрах выполнить достоверное расчетное определение условий вскипания теплоносителя в АкЗ ЯР не представляется возможным.

Данные систематизации различных концептуальных подходов и методов различных авторов, имевших целью получение эмпирических формул для расчета  $q_{н.к.}$ , представлены на рис. 1.

Анализируя характерные точки температурной кривой при переходе теплоотдающей поверхности от режима конвективной теплоотдачи к развитому пузырьковому кипению, а также оценивая соответствующие этим точкам аксиальные координаты последовательного ряда сечений ПК, следует



обратить внимание на существенные отличия в физической трактовке различными исследователями самого понятия «тепловой поток НК».

Рис. 1. Систематизация экспериментальных расчетных зависимостей по НК в ПК: 1 – температура стенки теплоотдающей поверхности; 2 – среднеинтегральная температура потока; 3 – истинное объемное паросодержание потока  $\varphi$ .

В работах одних авторов, например [8, 9], сечение А на рис. 1, в котором температура поверхности достигает температуры насыщения  $T_s$ , предложено считать именно тем сечением ПК, в котором и начинается поверхностное кипение. Напротив, в работах других исследователей, например [10, 11], предполагается, что в сечении А имеет место только конвективная теплоотдача к однофазной жидкости, а пузырьковое кипение начинается в сечении Б на рис. 1, в котором перегрев стенки ПК становится достаточным для образования паровых пузырей. Термодинамические условия их формирования с некоторыми допущениями и положены в основу расчетных формул такого типа.

Как известно [1, 11 и др.], появление первых паровых пузырей на теплоотдающей поверхности еще не оказывает существенного влияния на гидродинамику и теплообмен в ПК в этой начальной фазе пузырькового кипения. Вполне очевидно, что генерация паровой фазы начинает влиять на теплогидравлические характеристики потока лишь по мере увеличения его паросодержания. При этом монотонный характер изменения температуры стенки теплоотдающей поверхности на рис. 1 при переходе от конвективной теплоотдачи к кипению как раз и соответствует процессу накопления паровой фазы при увеличении тепловой нагрузки. С учетом этого обстоятельства за начало режима неразвитого пузырькового кипения в работе [12] условно принято сечение В (см. рис. 1), в котором отклонение температуры стенки от закономерностей теплоотдачи, характерной для конвективного теплообмена в однофазной жидкости, достигает величины порядка 10 % от величины температурного напора на теплоотдающей поверхности. Именно такие предпосылки имеют в своей основе те расчетные формулы, в которых  $q_{н.к.}$  принимается соответствующим тепловому потоку начала неразвитого кипения. В качестве условной границы между конвекцией однофазной жидкости и развитым пузырьковым кипением в некоторых других работах, принято сечение Г, определяемое из условия равенства температур стенки теплоотдающей поверхности в режиме конвективной теплоотдачи к однофазной жидкости и поверхностного кипения, т.е.  $T_{ст.конв} = T_{ст.кип}$ . Именно с таких позиций в этих работах постулируется, что сечение Г соответствует указанной условной точке пересечения касательных к кривой кипения на участке конвективной теплоотдачи и развитого кипения.

Экспериментами ряда исследователей было установлено, что, начиная с сечения Б, в котором на стенке ПК появляются первые паровые пузыри, истинное объемное паросодержание потока  $j$  в направлении его движения на достаточно протяженном участке кипящего канала составляет относительно незначительную величину (порядка 0,01). По мере прогрева ядра потока жидкости создаются условия для начала отрыва паровых пузырей от стенки канала. Этой фазе развития пузырькового кипения соответствует сечение Е на рис. 1. Эмпирические формулы для расчета  $q_{н.к.}$  в работах [13 и др.] получены на основе предположения о том, что именно сечение начала интенсивного роста истинного объемного паросодержания потока следует считать сечением НК теплоносителя. Так, в некоторых из этих исследований НК считается сечение «начала интенсивного роста» истинного объемного паросодержания, которое на рис. 1 соответствует аксиальной координате Ж, где этот параметр достигает величины порядка  $j \approx 0,015$ . Следует подчеркнуть, что указанное пороговое значение  $j$  выбрано не случайно, поскольку именно эта величина в настоящее время соответствует верхнему порогу чувствительности наиболее современных измерительных средств для  $\vartheta$ -просвечивания экспериментальных каналов. Таким образом, субъективность, нечеткость и значительную неточность используемой в этих работах качественной характеристики процесса вскипания теплоносителя в ПК, а именно определения «начала интенсивного роста  $j$ », следует признать вполне очевидными. Вместе с тем именно на основе использования таких оценок и были получены эмпирические формулы для расчета  $q_{н.к.}$  в работах [14, 15].

Не могут также быть признаны вполне адекватными сложному вероятностному характеру процесса активации центров парообразования на теплоотдающей поверхности при вскипании тепло-

носителя и другие упрощенные расчетные соотношения, которые основываются на предположении, что началом интенсивного роста паросодержания является сечение  $Z$ , достаточно условно определяемое точкой пересечения касательной к кривой изменения паросодержания  $j = f(l)$  с осью абсцисс. В других исследованиях началом пузырькового кипения также весьма условно предложено считать сечение  $II$ , в котором среднесмешанная температура потока достигает температуры насыщения.

Характеризуя процесс вскипания теплоносителя в ПК, следует подчеркнуть, что именно сечение начала интенсивного парообразования в диабатном неравновесном парожидкостном потоке является важнейшей реперной теплогидравлической характеристикой ПК. Начиная именно с этого сечения, паросодержание становится уже достаточно большим и начинает оказывать определяющее влияние на основные теплогидравлические параметры парожидкостного потока. На этот очевидный факт справедливо обращается внимание в [4, 16, 17], а также ряде других работ. Вполне очевидно, что надежная информация об этом важном реперном сечении необходима не только для задач оперативной диагностики теплогидравлических процессов (ТГП) в РУ, но и для разработки адекватных методик теплогидравлического расчета АкЗ. Естественно также, что эти данные являются определяющими во всех расчетных методиках, используемых для описания любых неравновесных кипящих потоков. Вместе с тем с учетом вышеизложенных девяти различных трактовок НК приходится констатировать, что в настоящее время у специалистов отсутствует единство мнений относительно того, что вообще следует считать началом интенсивного парообразования в ПК.

Так, в одних работах, например [18 и др.], сечением начала интенсивного парообразования авторы считают ту аксиальную координату ПК, в которой паровые пузыри начинают отрываться от стенки и уноситься потоком. Иными словами, резкий рост паросодержания в сечении интенсивного парообразования обусловлен, согласно этому подходу, появлением паровой фазы уже не только в пристенном слое, но и в ядре потока. Таким образом, в работах [18 и др.] и ряде других исследований фактически речь идет не о режиме НК теплоносителя и не об области неразвитого кипения (где паровые пузыри в условиях недогретого кипения растут и деградируют в пристенном слое, не успевая оторваться и выйти в ядро потока), а о начале области развитого кипения, для которой характерны именно отрыв пузырей и унос их потоком. На это принципиальное обстоятельство обращается, в частности, внимание в работе [19].

Анализируя предложенную в работах [18, 19] трактовку сечения ПК, в котором начинается интенсивное парообразование, необходимо отметить, что реализованный в этих показательных работах подход физически обоснован недостаточно. Широко известные результаты визуализации процесса генерации паровой фазы в условиях вынужденного движения недогретого теплоносителя [4, 20] свидетельствуют о достаточно сложной динамике изменения диаметров паровых пузырей, состоящей в следующем. Во-первых, паровые пузыри, достигая в процессе роста своего наибольшего размера, после соприкосновения их купола с недогретым потоком начинают деградировать. Характерно, что они отрываются от стенки, уже существенно уменьшившись в размерах. Во-вторых, степень и характер уменьшения диаметра паровых пузырей обуславливается не только глубиной недогрева ядра потока, но также и его динамическим воздействием, обуславливаемым величиной массовой скорости теплоносителя. Отмеченное позволяет заключить, что момент отрыва парового пузыря не соответствует фазе достижения им своих максимальных геометрических размеров. В этой связи рассматриваемый в указанных работах баланс сил, действующих на паровый пузырь в момент его отрыва, на основе анализа которого определяются условия эвакуации парового объема в поток, нельзя признать физически верным, в силу чего и предложенные в работах [18, 19] расчетные зависимости нельзя признать адекватными реальной физике процесса кипения в условиях вынужденного движения теплоносителя. Тем не менее, начиная с [21], в работах, где реализован такой подход, условия равновесия парового пузыря были весьма широко использованы для получения аналитических и полуэмпирических формул, использовавшихся для определения начала интенсивного кипения в ПК.

В других работах (например, [14]) за относительную энтальпию начала парообразования  $x_{н.п.}$  также достаточно условно было принято то ее значение, при котором, как это было отмечено выше, истинное паросодержание потока  $j$  может быть зарегистрировано современными измерительными приборами. Таким образом, указанная величина  $x_{н.п.}$  у различных авторов реально определяется только разрешающей способностью измерительных средств, использовавшихся авторами. В силу этого обстоятельства значения  $x_{н.п.}$ , полученные в [14] и ряде других исследований, основываются на весьма различных и, естественно, не вполне адекватно отражающих процесс НК значениях истинного паросодержания из достаточно широкого интервала  $j$ , который, в основном, соответствует диапазону

$j = 0,015...0,040$ . Вполне очевидно, что изложенная трактовка  $x_{н.п.}$  фактически обусловлена не реальными физическими особенностями перехода ПК от неразвитого пузырькового кипения в условиях недогрева к термически равновесному диабатному парожидкостному потоку, а определяется только метрологическими характеристиками использовавшихся в экспериментах измерительных средств.

С учетом изложенного анализа ряда расчетных методик определения условий НК теплоносителя в ПК, можно заключить следующее.

Аксиальная координата ПК, на которой современными измерительными средствами может быть обеспечена надежная регистрация резкого увеличения истинного паросодержания двухфазного диабатного парожидкостного потока, и условное сечение начала отрыва паровых пузырей от стенки ПК не только существенно отличаются друг от друга, но также и реально не соответствуют действительной координате сечения интенсивного роста паросодержания. При этом первая координата согласно подходу [14 и др.] соответствует НК, а вторая, предложенная в [18, 21 и др.], - началу генерации паровой фазы.

При расчетном определении значения недогрева  $DT_{н.к.}$ , которое соответствует условиям начала кипения в ПК, на основе зависимостей [14 и др.], а также в соответствии с предложенными в работах [18, 21 и др.] рекомендациями различия между соответствующими сечениями закипания могут достигать десятков градусов.

При увеличении тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности и уменьшении массовой скорости теплоносителя в ПК эти расхождения имеют тенденцию к дальнейшему увеличению.

Согласно третьему из известных концептуальных подходов к определению условий начала интенсивного парообразования в условиях вынужденного движения теплоносителя (этот подход реализован, в частности, в работах [22, 23]) энтальпия начала интенсивного парообразования соотносится с сечением  $z$ , которое было рассмотрено выше и представлено на рис. 1. Как указывалось, при рассмотрении девяти известных трактовок начала кипения, это сечение условно определяется точкой пересечения касательной к кривой изменения истинного паросодержания с осью абсцисс. Вместе с тем, как свидетельствуют, например, экспериментальные результаты [24], в большинстве случаев определить с приемлемой точностью угол наклона касательной к экспериментальной кривой, характеризующей распределение измеренных значений истинного паросодержания вдоль аксиальной координаты ПК, крайне сложно. В особой мере изложенное следует отнести к установлению той определяющей точки, в которой угол наклона касательной к указанной экспериментальной зависимости паросодержания перестает монотонно изменяться. Причина указанных трудностей кроется, прежде всего, в значительном разбросе экспериментальных данных, характеризующих распределение паросодержания вдоль канала. В силу этой, а также ряда других причин искомая точка пересечения касательной с осью абсцисс в некоторых экспериментах вообще не может быть определена.

На рис. 2 в качестве иллюстрации характера взаимного соответствия вышерассмотренных экспериментальных зависимостей по определению режима начала интенсивного парообразования в ПК, которые были получены на основе трех известных подходов к определению этого теплогидравлического режима неравновесного кипящего потока, представлены результаты сопоставления абсолютных значений относительной энтальпии начала интенсивного парообразования  $x_{н.п.}$ . С позиций системного анализа, а также оценки характера взаимного соответствия этих результатов необходимо отметить следующее.

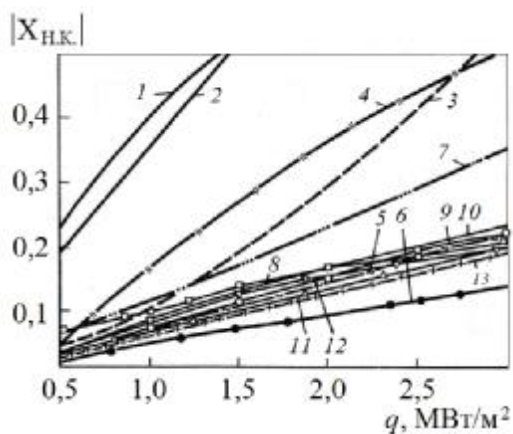


Рис. 2. Результаты расчета абсолютной величины относительной энтальпии начала интенсивного парообразования в ПК на основе известных расчетных зависимостей ( $P = 2,0$  МПа;  $\gamma_w = 1000$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) согласно работе [25]: 1 – 13 – данные различных исследователей.

Представленные данные характеризуются существенным (400...500 %) расхождением значений  $|x_{н.к.}|$ , полученных на основе известных расчетных зависимостей для определения условий начала интенсивного парообразования в неравновесном диабатном кипящем потоке.

Значительное расхождение расчетных значений по  $x_{н.к.}$  свидетельствует о неоднозначной интерпретации авторами различных частей области начала генерации паровой фазы на теплоотдающей поверхности.

Взаимное несоответствие различных зависимостей для определения условий вскипания теплоносителя в ПК свидетельствует о невозможности достоверной идентификации при помощи используемых расчетных методов и средств измерения как активации первых центров парообразования в ПК (режим неразвитого пузырькового кипения), так и начала интенсивного парообразования (нижняя часть области пузырьковой структуры парожидкостного потока), достигаемого при значении относительной энтальпии  $x_{н.п.}$ .

Таким образом, анализ характерных особенностей трех существующих в настоящее время подходов к определению условий вскипания теплоносителя в ПК, а также расхождений расчетных значений  $x_{н.к.}$ , полученных на основе соответствующих расчетных зависимостей, свидетельствует о недостаточной физической обоснованности этих подходов.

Резюмируя выполненный анализ существующих подходов к определению теплового потока начала кипения, необходимо констатировать следующее: в настоящее время известны девять основных физических подходов к определению теплового потока начала кипения теплоносителя в ПК.

Каждому из существующих подходов к физической трактовке нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока соответствуют различные участки кривой распределения температуры стенки ПК  $T_{ст} = f(l)$ , а также истинного паросодержания  $j = f(l)$  вдоль аксиальной координаты. Иначе говоря, упомянутые подходы характеризуют процесс перехода теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к развитому пузырьковому кипению с различных позиций, причем весьма неоднозначно.

Реальной причиной имеющихся расхождений в физической трактовке нижней границы режима пузырькового кипения следует считать отсутствие у авторов всех выполненных до настоящего времени исследований, посвященных определению  $q_{н.к.}$ , эффективных диагностических средств для экспериментального обнаружения и надежной идентификации таких ТГП, как собственно процесс активации первых центров парообразования, а также подрежимы возникновения неразвитого пузырькового кипения и начала интенсивного парообразования в нижней части области пузырькового режима течения.

Анализ чувствительности и разрешающей способности современных диагностических средств, применяемых для обнаружения процесса генерации паровой фазы в экспериментальных ПК, свидетельствует о том, что используемые методы и средства исследования двухфазных парожидкостных потоков (термометрия, оптическая голография, рентгеновское зондирование потока и др.) не способны обеспечить надежную идентификацию соответствующих режимов. В особой мере это относится к нижней части области перехода режима конвективной теплоотдачи к пузырьковому кипению. Кроме того, технические особенности реализации указанных методик лабораторного зондирования потоков делают невозможным их практическое использование в условиях реальных АкЗ энергетических ЯР.

Ранней автоматической идентификации аномальных теплогидравлических режимов в АкЗ реакторов ВВЭР, согласно современным требованиям, подлежат такие ТГП в нижней части области перехода режима конвективной теплоотдачи к устойчивой генерации паровой фазы, как квазистационарные режимы генерации пара первыми центрами парообразования и неразвитое пузырьковое кипение (см. сечения  $A...D$  на рис. 1).

Применительно к требованиям обеспечения теплогидравлической надежности АкЗ ЯР на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем перспективные диагностические системы также должны обеспечивать онлайн-распознавание начальных фаз вскипания теплоносителя. В этих случаях объектом диагностики может являться также нестационарный процесс активации первых центров парообразования на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, которому соответствует температурный режим теплоотдающей поверхности ТВЭЛ в области сечения  $A$  на рис. 1.

С учетом результатов вышеприведенного анализа известных подходов к решению актуальной проблемы обеспечения теплогидравлической надежности АкЗ водоохлаждаемых ЯР представляется возможным заключить следующее.

1. Эффективному использованию известных эмпирических корреляций для получения оценок НК при теплогидравлических расчетах АкЗ, а также для целей оперативного контроля НК препятствует ряд объективных обстоятельств. В их числе следует отметить в первую очередь невозмож-

ность получения достоверной оперативной информации по ряду определяющих значений параметров процесса теплоотдачи в ТВС, без которых надежная оценка НК на поверхности ТВЭЛ не может быть получена. Такова, в частности, недоступная в настоящее время для средств оперативного контроля АкЗ информация о фактическом распределении массовой скорости теплоносителя и его энтальпии в теплогидравлических ячейках ТВС, без сведений о которых надежный расчет НК не может быть выполнен.

2. Единственно возможным и наиболее эффективным способом оперативного обнаружения НК следует считать комплекс методов автоматического распознавания режимов генерации паровой фазы в АкЗ ЯР [26], который предусматривает компьютерную идентификацию этих режимов в реальном масштабе времени на основе информации, содержащейся в спектрах флуктуационных составляющих сигналов штатных датчиков ряда технологических параметров процесса теплообмена, в первую очередь давления, нейтронного потока и гидравлического сопротивления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теплофизика аварий ядерных реакторов: монография* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. - 528 с.
2. *Самойлов О. Б., Усынин Г. Б., Бахметьев А. М.* Безопасность ядерных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 279 с.
3. *Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. - 484 с.
4. *Толубинский В. И.* Теплообмен при кипении. - К.: Наук. думка, 1980. - 315 с.
5. *Jawurek H. H.* Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* - 1969. - Vol. 12, No. 8. - P. 843 - 848.
6. *Hsu S. T., Schmidt F. W.* // *Trans. ASME: Ser. C.* - 1961. - Vol. 83. - P. 37 - 48.
7. *Abdelmessih A. N., Yin S. T.* An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection: *Pro. Condens Pap. Two-Phase Flow and Heat Transfer Symp. - Workshop Fort Landerdale, Flj., 1976.* - P. 203 - 204.
8. *Бартоломей Г. Г., Харитонов Ю. В., Коврижкин В. П. и др.* Исследование гидравлического сопротивления при кипении перегретой воды в равномерно обогреваемой трубе // *Теплоэнергетика.* - 1979. - № 7. - С. 64 - 65.
9. *Миропольский З. Л., Хасанов-Агеев* Исследование различных режимов теплоотдачи при течении пароводяной смеси в каналах с внутренними греющими поверхностями // *Семинар ТФ-74. Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней.* - М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1974. - С. 237 - 250.
10. *Чернобай В. А.* О начале пузырькового кипения при вынужденном движении жидкости // *ИФЖ.* - 1971. - Т. 21. - С. 111.
11. *Надев А. Т.* К вопросу о возникновении пузырькового кипения жидкости // *Теплоэнергетика.* - 1976. - № 7. - С. 72 - 74.
12. *Ивашкевич А.А.* О границах развитого и неразвитого пузырькового режимов кипения жидкости в трубах. - Обнинск, 1971. - 25 с. - (Препр. / Физ.-техн. ин-т; № 292).
13. *Авдеев А. А.* Аналогия Рельнойдса для неразвитого пузырькового кипения в условиях вынужденного движения // *Теплоэнергетика.* - 1982. - № 3. - С. 23 - 26.
14. *Osmachkin V. S., Borisov V. D.* Pressure drop and heat transfer for flow of boiling water in vertical rod bundles // *Heat Transfer.* - 1970. - Vol. 5, pap. B.3.9. - P. 247 - 259.
15. *Молочников Ю. С., Баташова Г. Н., Михайлов В. Н. и др.* Обобщение экспериментальных данных по истинным объемным паросодержаниям при кипении воды с недогревом // *Теплоэнергетика.* - 1982. - № 7. - С. 47 - 50.
16. *Левитан Л. Л., Боровский Л. Я.* Голография пароводяных потоков. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 152 с.
17. *Делайе Дж., Гуо М., Ритмюллер М.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
18. *Ахмад С. И.* Распределение среднemasсовой температуры и истинного объемного паросодержания вдоль обогреваемого канала с недогревом на входе // *Теплопередача.* - 1970. - № 40. - С. 27 - 38.
19. *Авдеев А. А., Пехтерев В. П.* Критериальное уравнение для расчета кипящих потоков недогретой жидкости // *Теплоэнергетика.* - 1987. - № 2. - С. 20 - 24.
20. *Трещев Г. Г.* Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения // *Теплообмен при высоких тепловых нагрузках.* - М.: Госэнергоиздат, 1959. - С. 51 - 68.
21. *Bowring R. W.* Physical Model, Based on Bubble Detachment and Calculation of of Steam Veidage in the Subcooled Region of a Heated Channel // *Institute for Atomenergi, Halden rep. HPR.* - 1962. - Vol. 10. - 72 p.
22. *Бартоломей Г. Г.* Зависимость точки начала интенсивного парообразования при кипении с недогревом от режимных параметров // *Тр. МЭИ.* - 1982. - № 575. - С. 20 - 23.



23. *Миропольский З. Л.* Паросодержание в неравновесных парожидкостных потоках с подводом и отводом тепла // ТВТ. - 1971. - Т. 9, № 1. - С. 135 - 140.
24. *Бартоломей Г. Г., Михайлов В. Н.* Энтальпия начала интенсивного парообразования // Теплоэнергетика. - 1987. - № 2. - С. 17 - 20.
25. *Герлига В. А., Скалозубов В. И.* Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 432 с.
26. *Шараевський І. Г.* Розпізнавання передаварійних теплогідралічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - К.: ІПБ АЕС НАН України, 2010. - 48 с.

**І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін, Г. І. Шараєвський**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*

### **ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТЕПЛОФІЗИКИ ВИХІДНОЇ АВАРІЙНОЇ ПОДІЇ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ**

Представлено результати комплексного аналізу проблемних теплофізичних аспектів визначення початку кипіння теплоносія, яке стало вихідною аварійною подією Чорнобильської катастрофи. Розглянуто характер взаємозв'язку теплогідралічних та нейтронно-фізичних процесів, що відбулися в нижній частині активної зони реактора безпосередньо перед ядерною катастрофою. Критично проаналізовано відомі методи діагностики та контролю процесів генерації парової фази у водоохолоджуваних реакторах. Проаналізовано задачі розробки діагностичної системи нового покоління на основі інтелектуального програмного забезпечення.

*Ключові слова:* Чорнобильська катастрофа, вихідна аварійна подія, теплофізичні проблеми.

**I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G. I. Sharaevsky**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*

### **PROBLEMATIC ISSUES OF THERMOPHYSICS OF INITIAL EMERGENCY EVENTS OF THE CHERNOBYL DISASTER**

The results of a comprehensive analysis of the problem of thermal aspects of the definition of the beginning of the boiling coolant, which was the source of emergency events of the Chernobyl disaster are presented in this work. It considered the nature of the relationship of thermal-hydraulic and neutron-physical processes that took place in the bottom of the reactor core itself of a nuclear catastrophe. The well-known methods diagnostics and controls of a vapor phase generating process in water-cooled nuclear reactor were critical analyzed. The tasks of developing a new generation of diagnostic systems based on predictive software were analyzed.

*Keywords:* the Chernobyl disaster, the initial alarm event, thermophysical problems.

#### **REFERENCES**

1. *Thermophysics of nuclear reactor damages: monography / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al.* - Chernobyl: In-t problem bezopasnjsti NPP NAS of Ukraine, 2012. - 528 p. (Rus)
2. *Samoilov O. B., Usynin G. B., Bakhmetiev A. M.* Safety of nuclear ntrgttic plants. - Moskwa: Energoatomizdat, 1989. - 279 p. (Rus)
3. *Thermophysics of nuclear power plants safety: monography / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al.* - Chernobyl: In-t problem bezopasnjsti NPP NAS of Ukraine, 2010. - 484 p. (Rus)
4. *Tolubinsky V. I.* Heat transfer at the boiling. - Kiev: Naukova dumka, 1980. - 315 p. (Rus)
5. *Jawurek H. H.* Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1969. - Vol. 12, No. 8. - P. 843 - 848.
6. *Hsu S. T., Schmidt F. W.* // Trans. ASME: Ser. C. - 1961. - Vol. 83. - P. 37 - 48.
7. *Abdelmessih A. N., Yin S. T.* An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection: Pro. Condens Pap. Two-Phase Flow and Heat Transfer Symp. - Workshop Fort Landerdale, Flj., 1976. - P. 203 - 204.
8. *Bartolomey G. G., Kharitonov Yu. V., Kovrizhkin V. P. et al.* Research of hydraulic resistance at the overheating water boiling in the evenly heating pipe // Теплоэнергетика. - 1979. - № 7. - P. 64 - 65. (Rus)
9. *Miropolsky Z. L., Khasanov-Ageev* Study the different modes of heat transfer in the flow of steam-water mixture in the channels with the internal heating surface // Seminar TF-74. Issledovanie critcheskikh teplovykh potokov v puchkakh sterzhney. - Moskwa: IAE im. I. V. Kurchatova, 1974. - P. 237 - 250. (Rus)
10. *Chernobay V. A.* About the beginning of nucleate boiling at the forced motion of liquid // IFJ. - 1971. - Vol. 21. - P. 111. (Rus)



11. *Nadev A. T.* On the question of the occurrence of nucleate boiling liquid // *Теплоэнергетика*. - 1976. - № 7. - P. 72 - 74. (Rus)
12. *Ivashkevich A. A.* On the borders of developed and undeveloped nucleate boiling regime of liquid in the tubes. - Obninsk, 1971. - 25 p. - (Preprint / *Phys.-techn. in-t*; № 292). (Rus)
13. *Aydeev A. A.* Reynolds analogy for undeveloped nucleate boiling in a forced motion // *Теплоэнергетика*. - 1982. - № 3. - P. 23 - 26. (Rus)
14. *Osmachkin V. S., Borisov V. D.* Pressure drop and heat transfer for flow of boiling water in vertical rod bundles // *Heat Transfer*. - 1970. - Vol. 5, pap. B.3.9. - P. 247 - 259.
15. *Molochnikov Yu. S., Batashova G. N., Mikhailov V. N. et al.* The generalization of the experimental data on the true steam contents when boiling subcooled water // *Теплоэнергетика*. - 1982. - № 7. - P. 47 - 50. (Rus)
16. *Levitin L. L., Borevsky L. Ya.* Holography of the steam-water flows. - Moskwa: Energoatomizdat, 1989. - 152 p. (Rus)
17. *Delaye J., Gio M., Ritmuller M.* Heat transfer and hydrodynamics of two-phase flows in nuclear and thermal power: Translated from engl. - Moskwa: Energoatomizdat, 1984. - 424 p. (Rus)
18. *Akhmad S. I.* Distribution of bulk temperature and the true volume steam content along the heated channel subcooled inlet // *Теплоperedacha*. - 1970. - № 40. - P. 27 - 38. (Rus)
19. *Aydeev A. A., Pekhterev V. P.* Criterion equation for calculating the boiling streams of subcooled liquid // *Теплоэнергетика*. - 1987. - № 2. - P. 20 - 24. (Rus)
20. *Treshchev G. G.* Experimental study of the mechanism of surface boiling // *Теплообмен при vysokikh teplovykh nagruzkakh*. - Moskwa: Gosenergoizdat, 1959. - P. 51 - 68. (Rus)
21. *Bowring R. W.* Physical Model, Based on Bubble Detachment and Calculation of of Steam Veidage in the Subcooled Region of a Heated Channel // *Institute for Atomenergi, Halden rep. HPR*. - 1962. - Vol. 10. - 72 p.
22. *Bartolomey G. G.* The dependence of the starting point of intensive evaporation during boiling subcooled by regime parameters // *Trudy MEI*. - 1982. - № 575. - P. 20 - 23. (Rus)
23. *Miropolsky Z. L.* Vapor content in the vapor-liquid equilibrium flows from the inlet and outlet of heat // *TVT*. - 1971. - Vol. 9, № 1. - P. 135 - 140. (Rus)
24. *Bartolomey G. G., Михайлов В. Н.* The enthalpy of vaporization start intensive // *Теплоэнергетика*. - 1987. - № 2. - P. 17 - 20. (Rus)
25. *Gerliga V. A., Skalozubov V. I.* Bubble boiling flows in nuclear power equipment. - Moskwa: Energoatomizdat, 1992. - 432 p. (Rus)
26. *Sharaevsky I. G.* Recognition of pre-emergency hydraulic processes in water-cooling nuclear power reactors: Avtoref. dis. ... d-ra tech. nauk. - Kiev: IPB AES NAS of Ukraine, 2010. - 48 p. (Ukr)

Надійшла 01.12.2015  
Received 01.12.2015