

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАЧАЛА КИПЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЭЛ

Н. М. Фиалко, И. Г. Шараевский, Л. Б. Зимин, Н. О. Меранова

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

Критически проанализированы известные методы диагностики и расчетного определения момента начала устойчивой генерации паровой фазы в потоке недогретого теплоносителя. Показано, что ни один из существующих методов в силу их недостаточной достоверности и надежности не обеспечивает необходимого уровня эксплуатационной безопасности.

В энергетических ядерных реакторах (ЯР), охлаждаемых жидким теплоносителем, кипение последнего на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ является теплофизическим процессом, роль которого в обеспечении эксплуатационной безопасности энергоблоков трудно переоценить. Важнейшим моментом этого процесса, до настоящего времени нуждающегося в повышении надежности диагностических методов, является начало генерации паровой фазы. При этом в ряде случаев эксплуатационному персоналу ядерного энергоблока необходима диагностическая информация не только о факте начала генерации паровой фазы в конкретной части активной зоны (АкЗ) ЯР, но также и оперативные данные о положении аксиальной координаты сечения закипания теплоносителя по высоте соответствующей тепловыделяющей сборки (ТВС). Такие данные (их полнота определяется, в основном, типом реактора) необходимы в следующих целях:

для оценки распределения истинного объемного паросодержания и коэффициента реактивности по высоте реакторных каналов;

для обеспечения возможности контроля (иногда косвенного) за таким важным эксплуатационным параметром, как запас до кризиса теплоотдачи в ТВС.

Кроме того, надежные, экспериментально подтвержденные и обоснованные сведения о тепловом потоке  $q_{нк}$ , соответствующем режиму начала генерации паровой фазы и нижней границе пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока в кипящем канале, необходимы для решения задач теплогидравлического расчета АкЗ водоохлаждаемых энергетических ЯР. Подобные задачи приходится решать как при проектировании, так и при обеспечении стандартов безопасности для действующих и перспективных образцов ядерных энергоустановок (ЯЭУ) с реакторами некипящего и кипящего типов. Вполне очевидно, что указанные данные важны также и для оценки гидравлического сопротивления парогенерирующего канала, а также для определения его характеристик на экономайзерном и кипящем участках первичного контура.

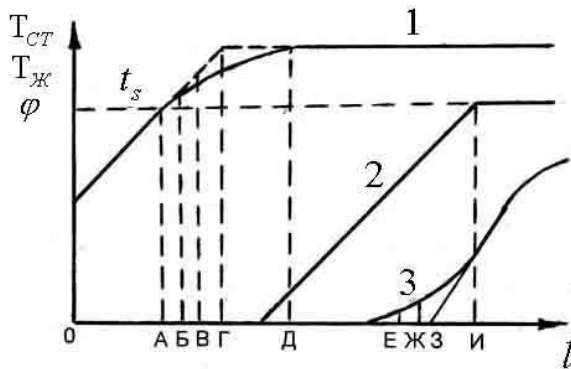
Нижеприведенный анализ посвящен обоснованию необходимости использования предлагаемого принципиально нового подхода к определению начала кипения [1, 2].

Потенциальная опасность неконтролируемого перехода режима теплосъема в АкЗ реакторных установок (РУ) типа ВВЭР от конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ сначала к пузырьковому кипению, а затем и к его пленочной форме (т.е. к кризису теплоотдачи 1-го рода) обуславливает необходимость обнаружения начала кипения. Вместе с тем чрезвычайно важен и материаловедческий аспект проблемы обнаружения вскипания теплоносителя в водоохлаждаемых ЯР. Как свидетельствует ряд экспериментальных исследований [3 - 5], причиной разрушения оболочек ТВЭЛ в области начала закипания могут стать усталостные напряжения их материала. При этом последние обусловлены температурными пульсациями, которые связаны с испарением микрослоев в основаниях паровых пузырей [6 - 8]. Так, авторами работы [3] было установлено, что в области начала пузырькового кипения на теплоотдающей поверхности возникают пульсации температуры стенки определенной частоты и амплитуды, зависящие от величин теплового потока  $q$ , массовой скорости  $\rho w$  и длины кипящего участка  $l$ . Исследования [4] показали, что при фиксированной массовой скорости

потока частота этих пульсаций тем выше, чем больше плотность теплового потока. При этом предполагалось, что сокращение эксплуатационного ресурса кипящей поверхности нагрева в области начала закипания является следствием разрушения на ней защитных гидроокисных пленок, что обусловлено действием микрогидравлических ударов, возникающих при деградации паровых пузырей в условиях недогретого кипения. Это предположение подтверждено данными работы [5], авторы которой обнаружили разрушение теплоотдающей поверхности имитатора ТВЭЛ в области перехода от конвекции к развитому кипению в условиях, когда запас по критическому тепловому потоку (КТП) при режимных параметрах эксперимента был еще весьма значителен.

В контексте сформулированных проблем, связанных с важным для безопасности ЯЭУ требованием оперативного обнаружения режима начала кипения в АкЗ, представляется необходимым проанализировать существующие подходы к определению начала кипения на поверхности ТВЭЛ, использующие ряд известных эмпирических расчетных зависимостей. Предваряя этот анализ, следует подчеркнуть, что практическое использование рассмотренных ниже эмпирических зависимостей для определения  $q_{нк}$  при эксплуатации РУ осложнено невозможностью контроля в условиях реальных АкЗ ряда важнейших расчетных параметров (например, массовой скорости теплоносителя в характерных теплогидравлических ячейках ТВС ЯР). Вполне очевидно, что в отсутствие надежной оперативной информации об этих параметрах выполнить достоверное расчетное определение условий вскипания теплоносителя в АкЗ ЯР не представляется возможным.

Данные по систематизации различных концептуальных подходов к определению теплового потока начала кипения, которые были реализованы в исследованиях различных авторов, имевших целью получение эмпирических формул для расчета  $q_{нк}$ , представлены на рисунке. Анализируя характерные точки температурной кривой теплоотдающей поверхности при ее переходе от режима конвективной теплоотдачи к развитому пузырьковому кипению, а также оценивая соответствующие этим точкам аксиальные координаты последовательного ряда сечений парогенерирующего канала, следует обратить внимание на существенные отличия в физической трактовке различными исследователями самого понятия «тепловой поток начала кипения».



Систематизация экспериментальных расчетных зависимостей по началу кипения в парогенерирующем канале:

1 – температура стенки теплоотдающей поверхности; 2 – среднеинтегральная температура потока; 3 – истинное объемное паросодержание потока.

Действительно, в работах одних авторов, например [9, 10], сечение «А», в котором температура теплоотдающей поверхности  $T_{CT}$

достигает температуры насыщения  $t_s$ , предложено считать именно тем сечением парогенерирующего канала, в котором и начинается поверхностное кипение. Напротив, в работах других исследователей, например [11, 12], предполагается, что в сечении «А» имеет место только конвективная теплоотдача к однофазной жидкости, а пузырьковое кипение начинается в сечении «Б» (см. рисунок), в котором перегрев стенки парогенерирующего канала становится достаточным для образования паровых пузырей. Термодинамические условия их формирования с некоторыми допущениями и положены в основу расчетных методов [11, 12].

Как известно [12], появление первых паровых пузырей на теплоотдающей поверхности еще не оказывает существенного влияния на гидродинамику и теплообмен в парогенерирующем канале 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 (см. рисунок) при переходе от конвективной теплоотдачи к кипению как раз и соответствует процессу накопления паровой фазы при увеличении тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности. С учетом этого обстоятельства за начало режима неразвитого пузырькового кипения в [13] условно принято сечение “В” (см. рисунок), 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  $q_{HK}$  принимается соответствующим тепловому потоку начала неразвитого кипения [14]. В качестве условной границы между конвекцией однофазной жидкости и развитым пузырьковым кипением в некоторых работах, например [15 - 17], 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 [15 - 17] постулируется, что сечение “Г” соответствует указанной условной точке пересечения касательных к кривой кипения на участке конвективной теплоотдачи и развитого кипения.

В ряде экспериментальных работ, например [18], было установлено, что, начиная с сечения “Б”, в котором на стенке парогенерирующего канала появляются первые паровые пузыри, истинное объемное паросодержание потока  $\phi$  в направлении его движения на достаточно протяженном участке составляет относительно незначительную величину (порядка 0,01). По мере прогрева ядра жидкости создаются условия для начала отрыва паровых пузырей от стенки канала. Этой фазе развития пузырькового кипения соответствует сечение “Е” (см. рисунок). Эмпирические формулы для расчета  $q_{HK}$  в [19, 20] получены на основе предположения о том, что именно сечение начала интенсивного роста истинного объемного паросодержания потока следует считать сечением начала кипения теплоносителя. Так, в [19] началом кипения считается сечение “начала интенсивного роста” истинного объемного паросодержания, которое на рисунке соответствует аксиальной координате “Ж”, где этот параметр достигает величины порядка  $\phi \approx 0,015$ . Именно на основе использования такой оценки и были получены эмпирические формулы для расчета  $q_{HK}$  в [21, 22]. Однако следует подчеркнуть, что указанное значение  $\phi$  выбрано не случайно: именно эта величина соответствует верхнему порогу чувствительности современных измерительных средств для  $\gamma$ -просвечивания экспериментальных каналов. То есть, вполне очевидны субъективность, нечеткость и значительная неточность указанной качественной характеристики процесса вскипания теплоносителя в парогенерирующем канале, а именно определения «начала интенсивного роста  $\phi$ ».

Предложенные в [18, 19] расчетные соотношения не могут быть признаны вполне адекватными сложному вероятностному характеру процесса активации центров парообразования на теплоотдающей поверхности также и потому, что основываются на предположении, что началом интенсивного роста паросодержания является сечение “З”, достаточно условно определяемое точкой пересечения касательной к кривой  $\phi = f(\ell)$  с осью абсцисс.

В некоторых исследованиях, таких, например, как [23], началом пузырькового кипения также весьма условно предложено считать сечение “И”, в котором среднесмешанная температура потока достигает температуры насыщения.

Характеризуя процесс вскипания теплоносителя в парогенерирующем канале, следует подчеркнуть, что именно сечение начала интенсивного парообразования в двухфазном кипящем неравновесном парожидкостном потоке является важнейшей реперной теплогидравлической характеристикой парогенерирующего канала. Действительно, начиная именно с этого сечения, паросодержание в потоке становится уже достаточно большим и начинает оказывать определяющее влияние на основные теплогидравлические параметры парожидкостного потока. На этот очевидный факт справедливо обращается внимание в [24, 25], а также в ряде других работ. Вполне очевидно, что надежная информация об этом важном реперном

сечении необходима не только в задачах оперативной диагностики теплогидравлических процессов в РУ но, кроме того, при разработке адекватных методик теплогидравлического расчета АкЗ водоохлаждаемых ЯР. Естественно, что эти данные являются определяющими во всех расчетных методиках, которые используются для описания любых неравновесных кипящих потоков. Вместе с тем, с учетом вышеизложенных девяти различных трактовок начала кипения, приходится констатировать, что в настоящее время у специалистов отсутствует единство мнений относительно того, что именно следует считать началом интенсивного парообразования в парогенерирующем канале.

Действительно, в одних работах, таких, например, как [20, 26], сечением начала интенсивного парообразования авторы считают ту аксиальную координату парогенерирующего канала, в которой паровые пузыри начинают отрываться от стенки и уноситься потоком. Иными словами, согласно этому подходу, резкий рост паросодержания обусловлен появлением паровой фазы уже не только в пристенном слое, но и в ядре потока. Однако в таком случае речь идет не о режиме начала кипения теплоносителя и области неразвитого кипения, когда паровые пузыри в условиях недогретого кипения растут и деградируют в пристенном слое, не успевая оторваться и выйти в ядро потока, а фактически о начале области развитого кипения, для которой характерны именно отрыв пузырей и унос их потоком. На это принципиальное обстоятельство обращается, в частности, внимание в [26].

Кроме того, в контексте физического анализа предложенной в [20, 26] трактовки сечения начала интенсивного парообразования необходимо отметить следующее. Реализованный в этих работах подход недостаточно физически обоснован. Как свидетельствуют результаты визуализации процесса генерации паровой фазы в условиях вынужденного движения недогретого теплоносителя [7, 27, 28], динамика изменения диаметров паровых пузырей достаточно сложна и состоит в следующем. Достигая в процессе роста небольшого геометрического размера, паровые пузыри после соприкосновения их купола с недогретым потоком начинают деградировать. При этом они отрываются от стенки, уже существенно уменьшившись в размерах. Степень и характер уменьшения диаметра паровых пузырей обуславливаются не только глубиной недогрева ядра потока, но также и его динамическим воздействием (массовой скоростью). Изложенное позволяет заключить, что момент отрыва парового пузыря фактически не соответствует фазе достижения им своих максимальных геометрических размеров. Поэтому рассматриваемый в работах [20, 26] баланс сил, действующих на паровой пузырь в момент его отрыва (на основе анализа этого баланса в рассматриваемых работах определяются условия эвакуации парового объема в поток), также нельзя признать физически обоснованным. Именно с учетом этого обстоятельства предложенные в этих работах расчетные зависимости не могут быть признаны адекватными реальной физике процесса кипения в условиях вынужденного движения теплоносителя. Тем не менее, в работах [19, 20, 26], реализовавших такой подход, условия равновесия парового пузыря были весьма широко использованы для получения аналитических и полуэмпирических формул, использовавшихся для определения начала интенсивного кипения в парогенерирующем канале.

В других работах (например, [21, 29]) за относительную энтальпию начала парообразования  $x_{н.н.}$  также достаточно условно было принято то ее значение, при котором, как это было отмечено выше, истинное паросодержание потока  $\varphi$  может быть зарегистрировано современными приборами. Таким образом, величина  $x_{н.н.}$  реально определялась лишь разрешающей способностью измерительных средств, использовавшихся различными авторами. В силу этого обстоятельства значения  $x_{н.н.}$ , полученные в [21, 29] и ряде других исследований, основываются на различных (и не вполне адекватно отражающих процесс начала генерации паровой фазы) данных об истинном паросодержании  $\varphi$ , которые, в основном, соответствуют диапазону  $\varphi = 0,015 \dots 0,040$ . Вполне очевидно, что такая трактовка  $x_{н.н.}$  обусловлена не реальными физическими особенностями перехода парогенерирующего канала от неразвитого пузырькового кипения в условиях недогрева к термически равновесному двухфазному

кипящему парожидкостному потоку, а определяется только метрологическими характеристиками использовавшихся в экспериментах измерительных средств.

На основании вышеизложенного, а также данных выполненного в [30] анализа ряда известных расчетных методик, можно заключить следующее:

аксиальная координата двухфазного кипящего парожидкостного потока, на которой современными средствами может быть обеспечена надежная регистрация резкого увеличения истинного паросодержания в потоке теплоносителя (т.е. начало кипения, согласно подходу [21, 29]), и условное сечение начала отрыва паровых пузырей от стенки канала (именно такая трактовка начала генерации паровой фазы, как отмечено выше, предложена в [20, 26]) не только существенно отличаются друг от друга, но также и реально не соответствуют действительной координате сечения начала интенсивного роста паросодержания;

при расчетном определении недогрева  $\Delta T_{н.к.}$ , который соответствует условиям начала кипения в парогенерирующем канале, по зависимостям [21, 29] и в соответствии с рекомендациями [20, 26] различия температуры в соответствующих сечениях закипания могут достигать десятков градусов;

при увеличении тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности и уменьшении массовой скорости теплоносителя в парогенерирующем канале указанные 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 [10, 18, 19]) энтальпия начала интенсивного парообразования соотносится с сечением «З» (см. рисунок). При вышеизложенном рассмотрении девяти известных трактовок начала кипения это сечение условно определяется точкой пересечения касательной к кривой изменения истинного паросодержания с осью абсцисс. Однако в большинстве случаев (как свидетельствуют, например, экспериментальные данные [29]) определить с приемлемой точностью угол наклона касательной к экспериментальным значениям истинного паросодержания вдоль аксиальной координаты парогенерирующего канала крайне сложно. В особой мере это следует отнести к установлению той определяющей точки, в которой угол наклона к экспериментальной зависимости паросодержания перестает монотонно изменяться. Причиной этого, прежде всего, является значительный разброс 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.

Подводя итог выполненному в настоящей статье анализу существующих подходов к определению начала кипения, необходимо констатировать следующее:

1. В настоящее время известны девять основных физических подходов к определению начала кипения теплоносителя в парогенерирующем канале.

2. Каждому из существующих подходов к физической трактовке нижней границы пузырьковой структуры двухфазного парожидкостного потока соответствуют различные участки кривой распределения температуры стенки теплоотдающей поверхности  $T_{cm} = f(\ell)$  и истинного паросодержания  $\varphi = f(\ell)$  вдоль аксиальной координаты парогенерирующего канала, которые с различных позиций (и весьма неоднозначно) характеризуют переход процесса на теплоотдающей поверхности от конвективной теплоотдачи к развитому пузырьковому кипению.

3. 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  $q_{НК}$ , эффективных диагностических средств для экспериментального обнаружения и надежной идентификации следующих теплогидравлических процессов: собственно процесса активации первых центров парообразования, а также подрежимов возникновения неразвитого пузырькового кипе-

ния и начала интенсивного парообразования в нижней части области пузырькового режима течения двухфазного парожидкостного потока.

4. Анализ чувствительности и разрешающей способности используемых лабораторных диагностических средств, применяющихся в целях обнаружения процесса генерации паровой фазы в экспериментальных парогенерирующих каналах (термометрия, оптическая голография,  $\gamma$ -зондирование пароводяного потока и др. [25]), свидетельствует о том, что существующие методы зондирования двухфазных парожидкостных потоков не обеспечивают возможности надежной идентификации режима начала кипения теплоносителя на теплоотдающей поверхности, в особенности в нижней части области перехода от режима конвективной теплоотдачи к пузырьковому кипению.

5. Технические особенности реализации методик зондирования двухфазных парожидкостных потоков делают невозможным их практическое использование в условиях реальных АкЗ энергетических ЯР.

6. С позиций необходимости раннего бесконтактного обнаружения аномальных теплогидравлических режимов реакторов ВВЭР в соответствии с подходами [1] автоматическому распознаванию подлежат теплогидравлические процессы в нижней части области перехода режима конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ к устойчивой генерации ею паровой фазы, т.е. стационарные режимы генерации паровой фазы первыми центрами парообразования и неразвитое пузырьковое кипение (сечения «А»...«Д» на рисунке).

7. С учетом требований, предъявляемых к быстродействию перспективных диагностических систем, которые призваны обеспечить онлайн-распознавание начальных фаз вскипания теплоносителя в ТВС РУ некоторых типов (например, применительно к требованиям обеспечения теплогидравлической надежности АкЗ ЯР на быстрых нейтронах типа БН), объектом диагностики является нестационарный процесс активации первых центров парообразования на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ, которому соответствует ее температурный режим в области сечения «А» на рисунке.

8. Принципиальный подход к решению задачи автоматического распознавания начала кипения теплоносителя в АкЗ энергетических ЯР в режимах активации первых центров парообразования (сечение «А» на рисунке), а также в условиях возникновения неразвитого пузырькового кипения (сечения «А» ... «Д» на рисунке) на основе информации, содержащейся во флуктуационных составляющих сигналов штатных датчиков ряда режимных параметров процесса теплообмена (давления, нейтронного потока, гидравлического сопротивления канала и др.), предложен в работе [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фуалко Н.М., Шараевский И.Г., Меранова Н.О.* Автоматическое обнаружение начала кипения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – Чернобыль, 2006. – Вип. 6. – С. 68 - 76.
2. *Sharaevskij I.* A methodology for discerning incipient boiling of the coolant in a water-moderated, water-cooled (pressurized-water) nuclear reactor by means of the Bayesian neutron-noise classifier // Proc. 14 th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-14). – July 17 - 20, 2006, Miami, Flo., USA. – Paper ICONE 14-89630. – 8 p.
3. *Abdelmessih A.H., Yin S.T.* An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection // Proc. Condens. Pap. Two-Phase Flow and Heat Transfer Symp. – Workshop. Fort Landerdale, Flo., 1976, p. 203 - 204.
4. *Рассохин Н.Г., Градусов Г.Н., Гумилева М.Г.* Особенности воздействия водного теплоносителя с высокой температурой на теплопередающую поверхность из алюминиевых сплавов при различных видах теплообмена // Тр. Моск. энерг. ин-та. - 1975. - Вып. 257. - С. 81 - 87.
5. *Кашинский В.И., Невструева Е.И., Романовский И.М.* Влияние отложений продуктов коррозии на температурный режим труб при развитом кипении // Кризисы теплообмена и околокритическая область. - Л.: Наука, 1977. – С. 189 - 196.
6. *Moone F.D., Mesler R.B.* The measurement of Rapid Surface Temperature Fluctuations During Nucleate Boiling of Water // AIChE Journal. - 1961. - Vol. 7, No. 4. - P. 620 - 624.

7. Толубинский В.И., Кривешико А.А., Островский Ю.Н. О пульсациях температуры поверхности нагрева под действующим центром парообразования // Теплофизика и теплотехника. – К.: Наук. думка, 1971. – Вып. 19. – С. 22 - 26.
8. Cooper M., Lloyd A. The microlayer in nucleate pool boiling // Int. Journ. Heat and Mass Transfer. – 1969. – Vol. 12, No. 8. – P. 895 - 913.
9. Бартоломей Г.Г., Харитонов Ю.В., Коврижных В.П. Исследование гидравлического сопротивления при кипении недогретой воды в равномерно обогреваемой трубе // Теплоэнергетика. - 1979. – № 7. – С. 64 - 65.
10. Миропольский З.Л., Хасанов-Агеев Л.Р. 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.
11. Чернобай В.А. О начале пузырькового кипения при вынужденном движении жидкости // ИФЖ. - 1971. - Т. 21, № 6. – С. 1119.
12. Надеев А.Т. К вопросу о возникновении пузырькового кипения жидкости // Теплоэнергетика. - 1976, № 7. – С. 72 - 74.
13. Ивашкевич А.А. О границах развитого и неразвитого пузырькового кипения жидкости в трубах. - Обнинск, 1971. – 25 с. - (Препр. / Физ.-энерг. ин-т; № 292).
14. Рассохин Н.Г., Мельников В.Н. К определению начала кипения недогретой воды в узких кольцевых каналах // Тр. Моск. энерг. ин-та. - 1971. - Вып. 81.- С. 92 - 99.
15. Сосков В.А. К определению границы начала развитого кипения в недогретой жидкости при расчете теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. - 1972. - № 9. – С. 67 - 69.
16. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 315 с.
17. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с.
18. Юнал Х.Ц. Определение среднего истинного объемного паросодержания, точки начала кипения и точки начала существенной генерации пара при кипении воды в винтовых змеевиках, обогреваемых жидким натрием // Теплопередача. - 1978. - № 2. – С. 109 - 117.
19. Martin R. Measurement of the local void fraction at high pressure in heating channel // Nuclear Science and Engineering. – 1972. – Vol. 48, No. 2. – P. 125 - 132.
20. Unal H.L. Void fraction and incipient point of boiling during the subcooled nucleate flow of water // Int. Journ. Heat and Mass Transfer. – 1977. – Vol. 20, No. 4. – P. 409 - 419.
21. Osmachkin V.S., Borisov V.D. Pressure drop and heat transfer for flow of boiling water in vertical rod bundles // Heat Transfer. – Amsterdam. – 1970. – Vol. 5, paper B.4.9. – P. 215 - 221.
22. Молочников Ю.С., Баташова Г.Н., Михайлов В.Н. Обобщение экспериментальных данных по истинным объемным паросодержаниям при кипении воды с недогревом // Теплоэнергетика. - 1982. - № 7. – С. 47 - 50.
23. Кузнецкий Р.С. Паросодержание и место вскипания жидкости в обогреваемой трубе // ИФЖ. - 1985. - № 5. – С. 632 - 634.
24. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – К.: Наук. думка, 1980. – 315 с.
25. Делайс Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
26. Авдеев А.А., Пехтерев В.П. Критериальное уравнение для расчета кипящих потоков недогретой жидкости // Теплоэнергетика. - 1987. - № 2. – С. 20 - 24.
27. Трещев Г.Г. Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения // Теплообмен при высоких тепловых нагрузках. – М.: Госэнергоиздат, 1964. – С. 51 - 68.
28. Костанчук Д.М., Толубинский В.И. Кинематографическое исследование механизма процесса кипения жидкости с недогревом в условиях свободной конвекции // Вопросы технической теплофизики. – К.: Наук. думка, 1969. – Вып. 2. – С. 12 - 15.
29. Бартоломей Г.Г., Михайлов В.Н. Энтальпия начала интенсивного парообразования // Теплоэнергетика. - 1987. - № 2. – С. 17 - 20.
30. Бобков В.П., Ивашкевич А.А., Митрофанова В.В. Систематизация разновидностей понятия начала кипения воды в парогенерирующей трубе. - Обнинск, 1983. – 32 с. - (Препр. / Физ.-энерг. ин-т; № 1448).

Поступила в редакцию 16.04.07

**4 ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКУ КИПІННЯ  
ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОВІДДАЮЧІЙ ПОВЕРХНІ ТВЕЛ****Н. М. Фіалко, І. Г. Шарасєвський, Л. Б. Зімін, Н. О. Меранова**

Критично проаналізовано відомі методи діагностики та розрахункового визначення моменту початку сталої генерації парової фази в потоці недогрітого теплоносія. Показано, що жоден з існуючих методів через їх недостатню достовірність та надійність не забезпечує необхідного рівня експлуатаційної безпеки.

**4 EVOLUTION OF APPROACHES TO DETERMINATION OF HEAT-CARRIER BOILING BEGINNING  
ON THE HEAT ALLOCATION SURFACE TVEL****N. M. Fialko, I. G. Sharaevskiy, L. B. Zimin, N. O. Meranova**

The known methods of diagnostic and computational definition of the beginning moment of a vapour phase steady generating in a flow of underheated heat carrier are critically parsed. It is shown, that any of existing methods by virtue of their poor veracity and reliability does not provide an indispensable level of operational safety.