

Э. Е. Бейгельзимер /к. т. н./

ООО «ОМД-инжиниринг», г. Днепро, Украина  
email: omd.engineering@gmail.com

## Подход к моделированию струйного охлаждения на основе построения экспериментальных кривой кипения

E. Yu. Beygelzimer /Cand. Sci. (Tech.)/

LLC «OMD-engineering», Dnipro, Ukraine  
email: omd.engineering@gmail.com

## Approach to the simulation of jet-impingement cooling based on the reference points of boiling curve

**Цель.** Разработка уточненного подхода для моделирования струйного охлаждения металла в широком диапазоне температур в условиях изменения режимов теплообмена от пленочного кипения до однофазной конвекции.

**Методика.** Уточнение механизмов переноса теплоты при струйном охлаждении поверхности с учетом переходных зон кривой кипения при изменении режимов кипения жидкости.

**Результаты.** Приведена методика обработки экспериментальных данных, позволяющая определять «опорные» точки кривой кипения на основе предложенной классификации.

**Научная новизна.** На основе предложенного подхода разработана классификация типов кривых кипения при струйном охлаждении поверхности без окалины.

**Практическая значимость.** С использованием результатов работы создано математическое обеспечение АСУ роликовых закалочных машин, успешно введенных в промышленную эксплуатацию на металлургическом комбинате «Северсталь» (Россия) и заводе «HSW-Huta-Stali» (Польша). (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** струйное охлаждение, металл, кривая кипения, пленочное кипение, пузырьковое кипение, переходное кипение, моделирование.

Многие процессы обработки горячих металлических изделий связаны с охлаждением струями воды или другой жидкости в широком диапазоне температур (например, закалка, контролируемое охлаждение и т. п.). В таких случаях по мере остывания поверхности реализуются несколько последовательных режимов теплоотдачи: от пленочного кипения до однофазной конвекции. При моделировании подобных процессов известные эмпирические формулы расчета теплоотдачи в разных режимах, как правило, не согласуются между собой, что приводит к разрыву решений на границах между ними.

Для описания динамики охлаждения изделий в широком диапазоне температур предлагается построение экспериментальной кривой кипения по ее характерным точкам с учетом переходных зон при изменении режима теплоотдачи. Такие точки можно назвать «опорными». При этом под кривой кипения понимается график зависимости плотности теплового потока от температуры поверхности [1].

На основе анализа экспериментальных данных в условиях отсутствия поверхностной окалины

(или когда окисленный слой настолько тонкий, что им можно пренебречь) на кривой кипения предлагается выделять следующие «опорные» точки (рис. 1):

*DFB* – выход из режима пленочного кипения (от англ. *Departure of Film Boiling*);

*EFB* – окончание режима пленочного кипения (*End of Film Boiling*);

*STB* – начало режима переходного кипения (*Start of Transient Boiling*);

*DTB* – выход из режима переходного кипения (*Departure of Transient Boiling*);

*ETB* – окончание режима переходного кипения (*End of Transient Boiling*);

*SNB* – начало режима пузырькового кипения (*Start of Nucleate Boiling*);

*DNB* – выход из режима пузырькового кипения (*Departure of Nucleate Boiling*);

*ENB* – окончание режима пузырькового кипения (*End of Nucleate Boiling*);

*SSC* – начало режима однофазной конвекции (*Start of Single-Phase Convection*).

Указанные «опорные» точки отвечают состояниям системы «поверхность – двухфазный по-

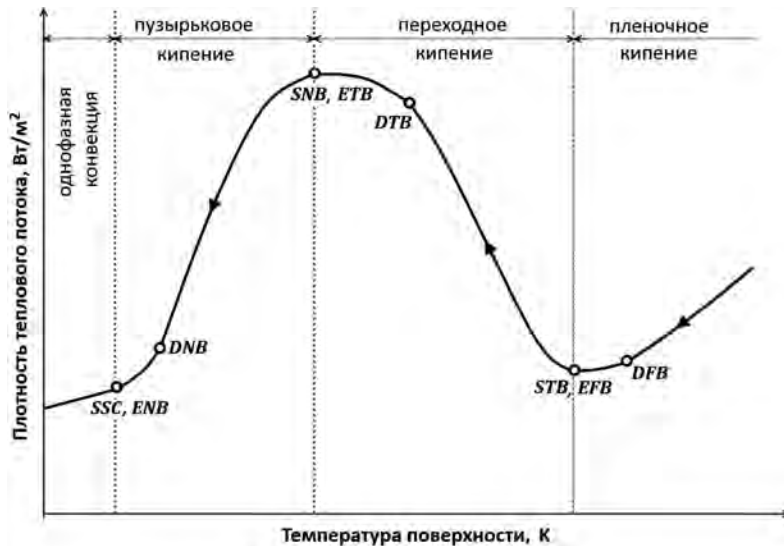


Рис. 1. Общий вид кривой кипения с опорными точками

ток жидкости», при которых меняется основной механизм переноса теплоты. При остывании поверхности до температуры, когда плотность теплового потока соответствует *DFB*, в единичных местах начинаются разрывы паровой прослойки, отделяющей жидкую фазу от твердого тела, и отдельные частицы жидкости испаряются уже с твердой поверхности, – происходит выход из режима «чистого» пленочного кипения. Пока контакты жидкой фазы с охлаждаемой поверхностью носят эпизодический и кратковременный характер, они могут не приводить к стабильному нарушению режима пленочного кипения (образно говоря, пробои паровой пленки «залечиваются»). По мере дальнейшего остывания случаи локального смачивания становятся более частыми и длительными, и при снижении температуры, когда плотность теплового потока соответствует *EFB* (она же *STB*), образуются стабильные островки поверхности с пузырьковым кипением. При дальнейшем снижении температуры эти «мокрые» пятна расширяются, развивается режим переходного кипения, сочетающий пленочное и пузырьковое кипение на разных участках поверхности. При плотности теплового потока, отвечающей точке *DTB*, процесс слияния соседних «мокрых» пятен начинает превалировать над процессом расширения каждого пятна, общая площадь, занятая пузырьковым кипением, растет уже не столь интенсивно, как раньше. При плотности теплового потока в точке *ETB* (она же *SNB*) пузырьковое кипение распространяется на всю поверхность. По мере дальнейшего остывания интенсивность пузырькового кипения снижается, а с переходом через тепловой поток *DNB* в отдельных местах поверхности вообще прекращается. Расширение площади, не занятой кипением, завершается в точке *ENB* (она же *SSC*), начинается режим однофазной конвекции.

Граничные точки соседних режимов в представленной на рис. 1 схеме совпадают (*EFB = STB*, *ETB = STB*, *ENB = SSC*). Поэтому в общем случае на кривой кипения могут наблюдаться не более 6 «опорных» точек. В частных случаях участки между выходом из данного режима и его окончанием (т. е. между точками *D..* и *E..*) могут стягиваться до нуля, и в «минимальном» варианте остаются всего 3 «опорные» точки, характеризующие окончание режимов пленочного (*EFB*), переходного (*ETB*) и пузырькового (*ENB*) кипения.

В технической литературе с описанными «опорными» точками кривой кипения связывают различные термины и понятия. Например, с точкой *ETB* (*SNB*) – первое критическое состояние [2], первый кризис кипения, критическую плотность теплового потока [3; 1], с точкой *EFB* (*STB*) – второе критическое состояние [2], второй кризис кипения [1], температуру Лейденфроста [4], минимальный тепловой поток [5].

Моделирование процесса струйного охлаждения на основе использования «опорных» точек кривой кипения включает следующие этапы:

- на основании экспериментальных данных или эмпирических зависимостей, построенных на их основе, для данного расчетного участка установки охлаждения определяются координаты опорных точек, т. е. температура поверхности и плотность теплового потока в точке выхода из режима пленочного кипения (*DFB*), окончания пленочного кипения (*EFB*), выхода из режима переходного кипения (*DTB*) и т. д.;

- строится кривая кипения, отвечающая данному расчетному участку установки охлаждения. Для этого кривая, соединяющая опорные точки, описывается функциями заданного вида (например, линейными);

- по полученной кривой кипения определяется плотность теплового потока от поверхности

металла по длине данного участка установки охлаждения.

Определяющим в реализации предложенного подхода является этап, связанный с расчетом температуры поверхности и теплового потока в «опорных» точках кривой кипения. Поэтому получение эмпирических зависимостей для расчета этих параметров требует правильной идентификации характерных состояний системы по опытным кривым. Для повышения надежности полученных данных предложена система классификации типов кривых кипения с критериями идентификации опорных точек (табл. 1).

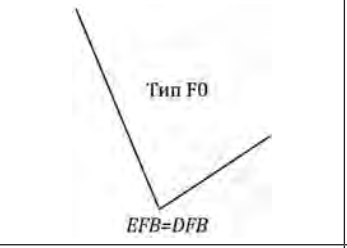
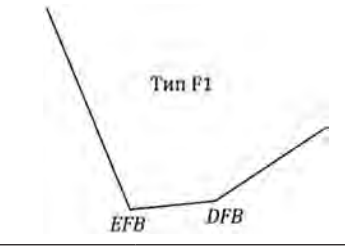
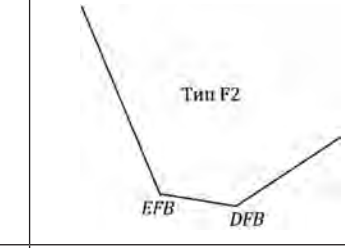
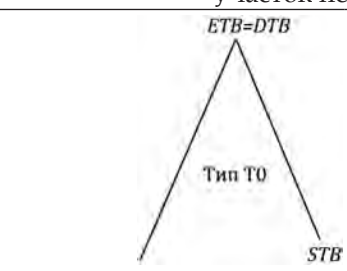
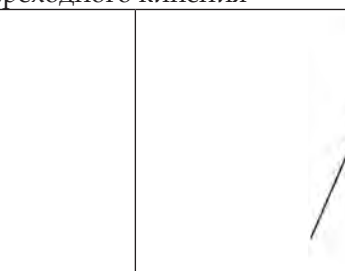
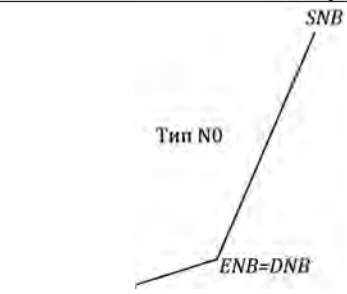
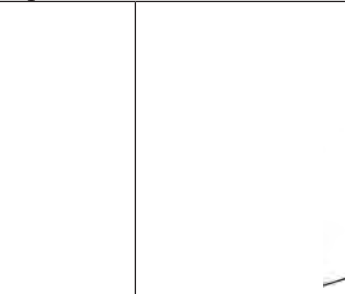
Участок пленочного кипения может быть трех типов: без участка выхода из этого режима (тип F0), с отрезком постепенного снижения тепло-

вого потока (тип F1) и с отрезком постепенного увеличения теплового потока (тип F2). Участок переходного кипения может быть двух типов: без участка выхода (тип T0) и с отрезком пониженной интенсивности роста теплового потока (тип T1). Участок пузырькового кипения также может быть двух типов: без участка выхода (тип N0) и с отрезком замедленного снижения теплового потока (тип N1). Обозначение типа кривой кипения в целом складывается из обозначений типов участков пленочного, переходного и пузырькового кипения.

В качестве примера на рис. 2 показано применение предложенной классификации к реальной кривой кипения, полученной в работе [6]. Ниже этой кривой на том же рисунке приведен гра-

Таблица 1

Типы кривых кипения при отсутствии окалины на охлаждаемой поверхности (отрезки кривых схематично изображены прямыми линиями)

Участок пленочного кипения			
Вид функции на участке пленочного кипения			
Функция	В точке EFB – минимум	В точке EFB – минимум	В точке DFB – минимум
Первая производная	В точке EFB равна 0	В точке EFB – равна 0, DFB – больше 0	В точке EFB – меньше 0, DFB – равна 0
Вторая производная	В точке EFB – локальный максимум	В точке DFB – локальный максимум, EFB – больше 0	В точке EFB – локальный максимум, DFB – больше 0
Участок переходного кипения			
Вид функции на участке пленочного кипения			
Функция	В точке ETB – максимум	В точке ETB – максимум	
Первая производная	В точке ETB – равна 0	В точке ETB – равна 0, в точке DTB – меньше 0	
Вторая производная	В точке ETB – локальный минимум	В точках ETB и DTB – локальные минимумы	
Участок пузырькового кипения			
Вид функции на участке пленочного кипения			
Функция	–	–	
Первая производная	В точке ENB – больше 0	В точках ENB и DNB – больше 0	
Вторая производная	В точке ENB – локальный максимум	В точках ENB и DNB – локальные максимумы	

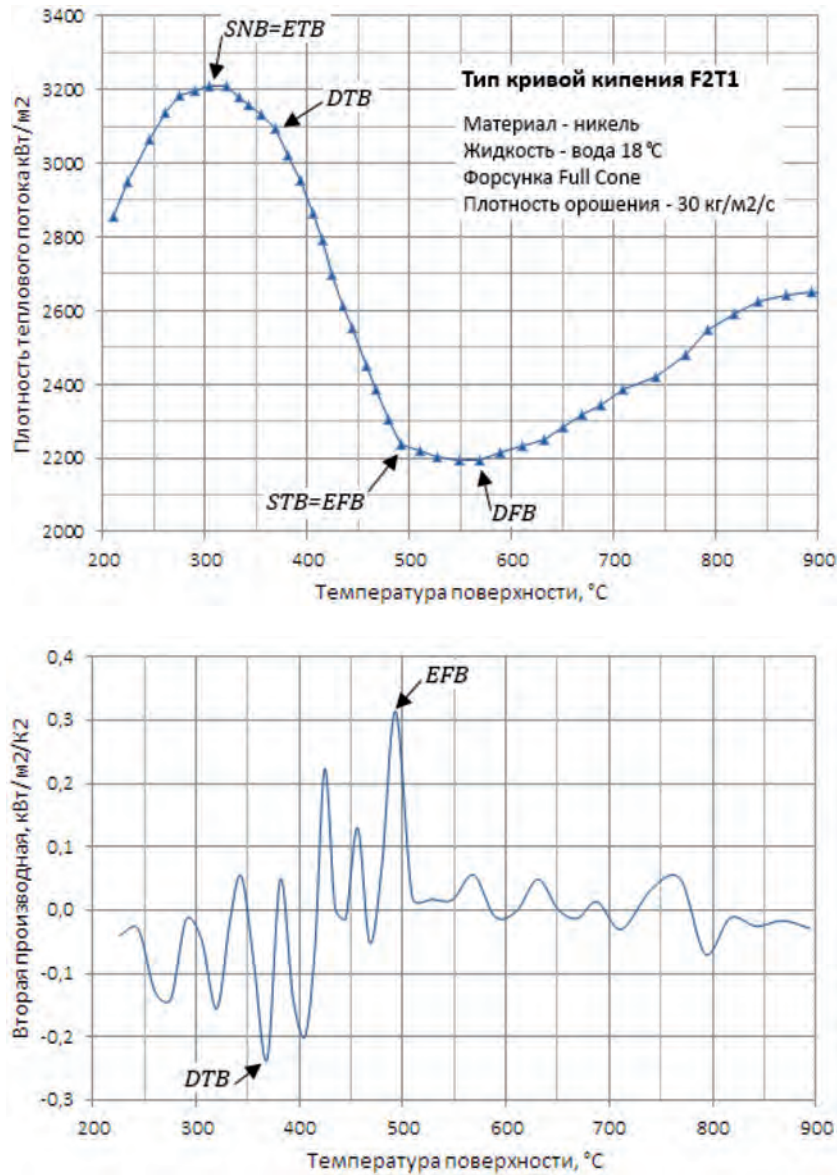


Рис. 2. Пример кривой кипения типа F2T1 (авторская обработка данных [6])

фик второй производной плотности теплового потока по температуре поверхности (графики, включая кривую кипения, построены автором путем обработки данных [6]). В соответствии с табл. 1 рассматриваемую кривую кипения следует отнести к типу F2T1. На участке температур от 600 до 450 °С присутствуют две характерные точки: одна – при температуре 560 °С (первая производная равна нулю), другая – при температуре 495 °С (вторая производная имеет выраженный локальный максимум). В соответствии с критериями, указанными в табл. 1, это дает основания считать первую точку точкой выхода из режима пленочного кипения DFB, а вторую – точкой окончания режима пленочного кипения EFB. Соответственно, участок пленочного кипения в рассматриваемом случае следует отнести к типу F2. Точка начала режима пузырькового кипения SNB (она же – окончания режима переходного кипения ETB) однозначно идентифицируется

в точке максимума самой функции плотности теплового потока и нулевого значения первой производной. Кроме этого, на участке между точками STB и ETB идентифицируется точка выхода из режима переходного кипения DTB, в которой вторая производная имеет выраженный локальный минимум. Поэтому участок переходного кипения можно отнести к типу T1. Таким образом, представленную на рис. 2 кривую кипения следует отнести к типу F2T1 (интервал температур однофазной конвекции в работе [6] не описан, поэтому обозначение кривой кипения состоит только из двух участков). Координаты опорных точек этой кривой следующие: DFB – 560 °С, 2190 кВт/м²; EFB (STB) – 495 °С, 2240 кВт/м²; DTB – 370 °С, 3090 кВт/м²; ETB (SNB) – 310 °С, 3210 кВт/м².

На рис. 3 показан другой пример экспериментальной кривой кипения и графика ее второй производной, построенных автором по данным

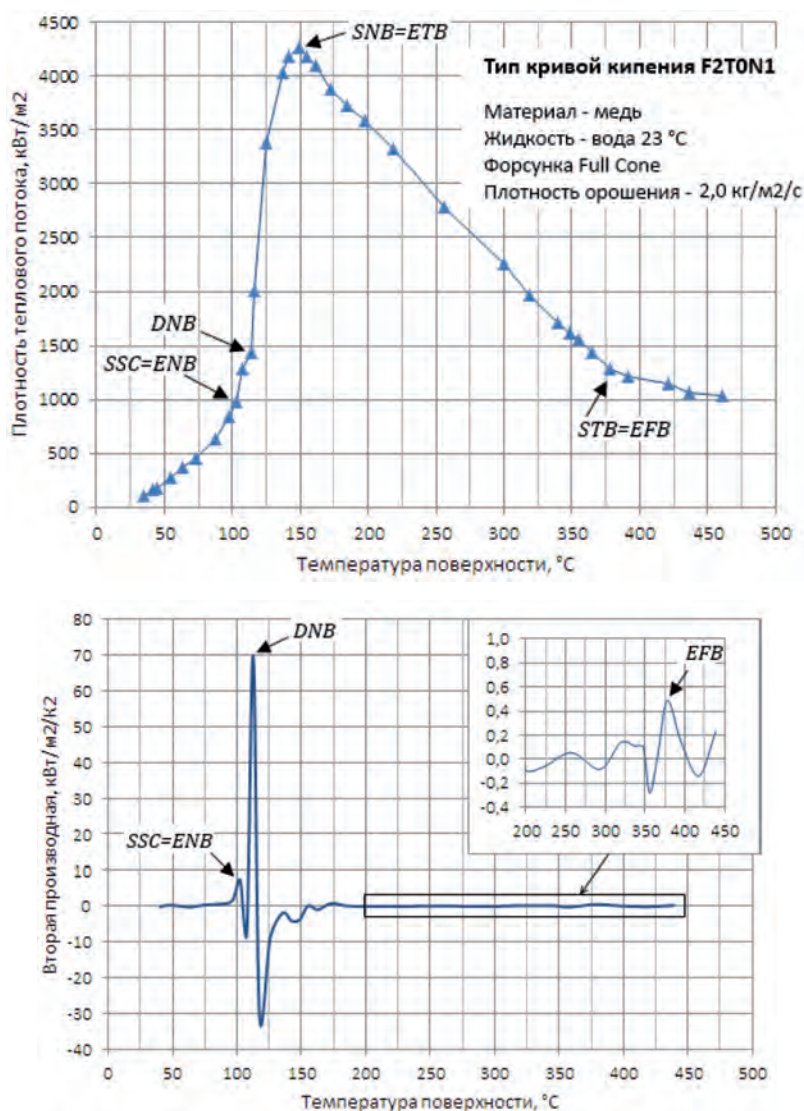


Рис. 3. Пример кривой кипения типа F2T0N1 (авторская обработка данных [7])

работы [7]. На начальном этапе охлаждения четко обозначается перегиб кривой плотности теплового потока с локальным максимумом второй производной при температуре 380 °C. В соответствии с табл. 1 эта точка идентифицирована как окончание режима пленочного кипения (EFB), а сам участок пленочного кипения отнесен к типу F2. Максимальная плотность теплового потока наблюдается при температуре 150 °C (точка SNB, она же - ETB). Участок кривой в области переходного кипения между точками STB и ETB не имеет явно выраженных перегибов, что дает основания отнести его к типу T0. На участке пузырькового кипения вторая производная имеет два локальных максимума: при температуре 115 °C (точка DNB) и чуть больше 100 °C (точка ENB, она же SSC), т. е. этот участок относится к типу N1. Таким образом, рассматриваемую кривую кипения в целом следует отнести к типу F2T0N1. Координаты опорных точек этой кривой следующие: EFB (STB) - 380 °C, 1280 кВт/м<sup>2</sup>; ETB (SNB) - 150 °C,

4270 кВт/м<sup>2</sup>; DNB - 115 °C, 1440 кВт/м<sup>2</sup>; ENB (SSC) - 100 °C, 980 кВт/м<sup>2</sup>.

Предложенный подход может быть использован для обобщения экспериментальных данных струйного охлаждения изделий и позволит получить новые эмпирические зависимости для определения координат «опорных» точек кривых кипения.

Предложенный подход моделирования системы охлаждения использован автором при разработке математического обеспечения АСУ и вводе в промышленную эксплуатацию роликовых закалочных машин на металлургическом комбинате «Северсталь» (Россия) и заводе «HSW-Huta-Stali» (Польша) [8].

**Выводы.** Разработан подход к моделированию процессов струйного охлаждения металла в широком диапазоне температур в условиях изменения режимов теплообмена от пленочного кипения до однофазной конвекции. Подход основан на построении кривой кипения по «опорным»

точкам. Для идентификации «опорных» точек по экспериментальным данным предложена классификация типов кривых кипения. С использованием описанного подхода разработано математическое обеспечение роликовых закалочных машин, успешно введенных в промышленную эксплуатацию.

**Библиографический список / References**

1. Григорьев В. А. Кипение криогенных жидкостей / В. А. Григорьев, Ю. М. Павлов, Е. В. Аметистов. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.

Grigoriyev V. A., Pavlov Yu. M., Ametistov Ye. V. *Kipeniye kriogennykh zhydkostey*. Moscow, Energiya, 1977, 288 p.

2. Калинин Э. К. Кризисы теплообмена при кипении – частный случай плавной смены пузырькового и пленочного режимов кипения / Э. К. Калинин // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 59, № 3. – С. 437–445.

Kalinin E. K. *Krizisy teploobmena pri kipeniyi – chastnyi sluchay plavnoy smeny puzyrkovogo i plyonochnogo rezhimov kipeniya*. Inzhenerno-phizicheskiy zhurnal, 1990, vol. 59, no. 3, pp. 437-445.

3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат. 1979. – 416 с.

Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena*. Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p.

4. Leidenfrost phenomenon: jet impingement quenching perspective / M. A. Islam [et al.] // Proceedings of the 3rd BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering, 20–22 December 2006. – Dhaka, Bangladesh. – 2006. – P. 91–97.

Islam M. A., Monde M., Woodfield P. L., Mozumber A. K., Mitsutake Y. *Leidenfrost phenomenon: jet impingement quenching perspective*. Proceedings of the 3rd BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering, 20-22 December 2006. Dhaka, Bangladesh, 2006, pp. 91-97.

5. Klinzing W. P. Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays / W. P. Klinzing, J. C. Rozzi, I. Mudawar // Journal of Heat Transfer. – 1992. – Vol. 9. – P. 91–103.

Klinzing W. P., Rozzi J. C., Mudawar I. *Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays*. Journal of Heat Transfer. 1992, vol. 9, pp. 91-103.

6. Wendelstorf J. Effect of oxide layers on spray water cooling heat transfer at high surface temperatures / J. Wendelstorf, K.-H. Spitzer, R. Wendelstorf // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – P. 4892–4901.

Wendelstorf J., Spitzer K.-H., Wendelstorf R. *Effect of oxide layers on spray water cooling heat transfer at high surface temperatures*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51, pp. 4892-4901.

7. Mudawar I. Determination of the Local Quench Curve for Spray-Cooled Metallic Surfaces / I. Mudawar, W. S. Valentine // Journal of Heat Treating. – 1989. – Vol. 7. – P. 107–121.

Mudawar I., Valentine W. S. *Determination of the Local Quench Curve for Spray-Cooled Metallic Surfaces*. Journal of Heat Treating. 1989, vol. 7, pp. 107-121.

8. Роликовые закалочные машины конструкции ПАО «НКМЗ» / В. Н. Тиунов, С. А. Гриценко, А. Л. Остапенко, Э. Е. Бейгельзимер, Д. А. Козленко // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 67–71.

Tiunov V. N., Gritsenko S. A., Ostapenko A. L., Beygelzimer E. Ye., Kozlenko D. A. *Rolikovyye zakalochnyye mashyny konstruktsyi PAO “NKMZ”*. Stal, 2014, no. 12, pp. 67-71.

**Purpose.** Development of a mathematical tool for simulation of jet-impingement cooling of metal over a wide range of temperatures without breaking solutions at the boundaries between the boiling regimes.

**Methodology.** Systematization of heat transfer mechanisms in the surface boiling of a liquid.

**Findings.** Examples of real boiling curves with identification of reference points on the basis of the proposed classification are given.

**Originality.** On the basis of the proposed approach, a classification of the types of boiling curves for the jet-impingement cooling of a surface without scale has been developed.

**Practical value.** With the use of the results of the work, the software was provided to the automated control systems for roller hardening machines successfully put into commercial operation at the Severstal metallurgical plant (Russia) and the HSW-Huta-Stali plant (Poland).

**Key words:** jet-impingement cooling, metal, boiling curve, film boiling, nucleate boiling, transient boiling, simulation.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. М. В. Губинским**

**Поступила 25.04.2017**

