

## АППАРАТУРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ ВОДЫ

Ечмаев С. Б., Жуков С. А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем химической физики РАН,  
142432, Россия, Черноголовка, проспект академика Семенова, 1  
E-mail: [echmaev@cat.icp.ru](mailto:echmaev@cat.icp.ru)

Исследование теплопередачи от нагретой поверхности в жидкость имеет большое значение для создания теплообменных устройств в различных областях техники. Кроме того это явление представляет и большой научный интерес. Термин «кипение» исторически используется в значении теплопередачи от нагревателя, помещенного в жидкость. В зависимости от температуры нагревателя и жидкости, геометрии нагревателя, скорости потока жидкости и других факторов механизм теплопередачи может меняться. При этом говорят о различных режимах кипения. Во всех практически интересных случаях основной вклад в теплопередачу обусловлен движением жидкости, вызванным наличием источника тепла (нагревателя). При низкой «тепловой нагрузке» (удельной поверхностной тепловой мощности) реализуется режим вынужденной конвекции — течение жидкости вызывается архимедовой силой за счет зависимости плотности от температуры. Этот режим в координатах температура нагревателя — удельная мощность представляется в первом приближении прямой линией с небольшим наклоном. При дальнейшем повышении температуры нагревателя возникает пузырьковый режим кипения — теплоотдача скачком повышается, зависимость мощности от температуры становится более крутой. При этом механизм движения жидкости обусловлен образованием пузырьков вблизи нагревателя и их движением. При дальнейшем увеличении температуры нагревателя может возникнуть «пленочный» режим кипения — жидкость отделяется от поверхности нагревателя паровой пленкой. При этом теплопередача значительно ухудшается из-за малой теплопроводности паровой фазы. Вся совокупность процессов теплопередачи в этих координатах называется кривой кипения (кривой Нукиямы). Следует отметить, что это неоднозначная функция — при некоторых температурах возможно существование и сосуществование двух режимов. Большая часть исследований теплопередачи при кипении проводится на больших массивных образцах, что дает возможность получать только усредненные по времени и пространству характеристики.

Наша исследовательская группа сосредоточила исследования на теплопередаче от тонких проволочных нагревателей. Такой подход является стремлением получить «точечные» характеристики теплопередачи с хорошим временным разрешением. В качестве нагревательного элемента мы используем тонкие проволоки из платины. Использование чистой платины позволяет очень точно определять температуру проволоки по хорошо известной эталонной зависимости удельного сопротивления платины от температуры. Тонкую проволоку можно очень быстро нагревать электрическим током. Таким образом, проволока является одновременно и нагревателем, и термометром. На рисунке 1 приведена блок-схема электронной части наших экспериментальных установок.

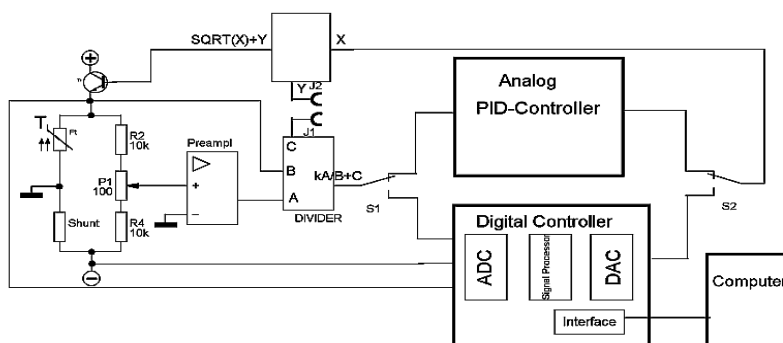
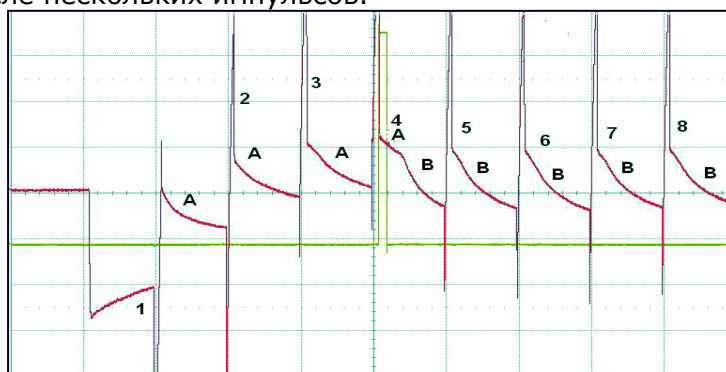


Рис.1. Блок-схема электронного регулятора температуры

Температура проволоки измеряется мостовой схемой. Сигнал разбаланса усиливается предусилителем, затем этот сигнал поступает на схему аналогового деления на напряжение питания. Таким образом получается сигнал пропорциональный отклонению температуры от заданной, не зависящий уже от величины напряжения питания. Такой подход примененный

нами позволил существенно улучшить временные характеристики регулятора температуры. Далее сигнал поступает на ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятор — классический способ регулирования температуры. Затем идет схема коррекции мощности для линеаризации зависимости мощности от сигнала ПИД-регулятора. Ключевым элементом является схема деления, впервые примененная нами. Рассмотрим случай отклонения температуры, требующей повышения мощности нагрева. При этом сигнал разбаланса усиливается и вызывает увеличение напряжения на мосте. При этом без использования блока деления сигнал разбаланса увеличивается еще больше пока нагреватель еще не успел нагреться — таким образом формируется положительная обратная связь, препятствующая построению быстрых регуляторов. Блок деления устраняет этот недостаток. Применение такой схемы регулирования позволило нам реализовать новый режим кипения — так называемый режим сверхинтенсивного пузырькового кипения (СПК), в котором были достигнуты рекордные величины удельного теплового потока до десятков киловатт на квадратный сантиметр поверхности [1]. При этом реализуются сложные гидродинамические течения, обеспечивающие гигантскую теплопередачу. Японские исследователи получили близкие тепловые потоки с поверхности, направляя на нее струю воды с очень большой скоростью. Детальные исследования выявили интересные особенности этого режима. Нами было установлено, что после установления такого режима при резком уменьшении температуры нагревателя теплоотдача некоторое время (несколько миллисекунд) не падает. Иногда даже после уменьшения она может спонтанно вырастать почти до прежних высоких значений. Оказалось, что чем точнее мы поддерживаем температуру нагревателя, тем больше становятся колебания подводимой мощности. Таким образом, для локальных (точечных) нагревателей и коротких временных интервалов кривая Нукиямы теряет смысл. Также наблюдались некоторые периодические явления в гидродинамике и теплопередаче. Этот режим характеризуется образованием вокруг нагревателя «шубы» из пузырьков. Потоки жидкости уже не зависят от направления силы тяжести.

Периодические явления, наблюдавшиеся в режиме СПК натолкнули нас на идею попытки поиска резонансных явлений при кипении [2]. С этой целью мы провели серию экспериментов по многоимпульсному нагреву проволочного нагревателя. Схема эксперимента была изменена. На нагреватель подавались импульсы мощности с изменяемой частотой, амплитудой и скважностью. В промежутке между импульсами на нагреватель подавалось небольшое постоянное напряжение для регистрации температуры. Мощности стабилизировались использованием быстрого аналогового умножителя в обратной связи. Использовался миниатюрный нагреватель диаметром 20 микрон и длиной около миллиметра. Оказалось, что при определенной частоте и амплитуде при увеличении мощности пузырьковый режим сменяется новым необычным режимом теплопередачи. Исчезает характерный для режима СПК акустический шум, обусловленный схлопыванием пузырьков. Полностью исчезает парообразование, а вокруг нагревателя образуется заметная даже невооруженным глазом стационарная волна плотности с характерным размером около нескольких миллиметров. Однако средняя рассеиваемая мощность примерно соответствует мощности в режиме СПК. Мы назвали это явление режимом сверхинтенсивной конвекции. Мы исследовали процесс установления этого режима. Оказалось, что при наших условиях квазистационарный режим теплоотдачи устанавливался после нескольких импульсов.



**Рис. 2.** Оциллограмма температуры при импульсном нагреве. **А** — медленное остывание, **В** — быстрое

Сначала температура повышается и скорость охлаждения после исчезновения импульсов нагрева мала, но потом наблюдается скачкообразное увеличение скорости охлаждения, а средняя температура падает. В квазистационарном режиме наблюдается

удивительная воспроизводимость зависимости температуры от времени. Мы провели макросъемку процесса установления этого режима. Для этого было получена серия фотографий в различные моменты импульсной последовательности. Никаких пузырьков не было обнаружено. При еще большем повышении мощности наблюдалось образование короткоживущей паровой пленки на части поверхности нагревателя. При этом, естественно, на кривой охлаждения наблюдалось небольшое плато из-за ухудшения теплового контакта.

Режим существует в довольно широком диапазоне величин мощности импульсов. Характерная частота при наших условиях была порядка десятков килогерц, скважность составляла около 10 процентов.

## **THE APPARATUS FOR GENERATION AND INVESTIGATION OF BOILING REGIMES IN WATER**

***S.B. Echmaev, S.A. Zhukov***

Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences

E-mail: [echmaev@cat.icp.ac.ru](mailto:echmaev@cat.icp.ac.ru)

### **Литература**

1. S.A. Zhukov, S. Yu. Afanas'ev, S. B. Echmaev // Concerning the magnitude of the maximum heat flux and the mechanisms of superintensive bubble boiling. Int. J. Heat and Mass Transfer 46 (2003), p 3411-3427.
2. Ечмаев С. Б., Жуков С. А. // Исследование устойчивости метастабильных состояний в условиях повторяющихся импульсных тепловых нагрузок. ТВТ, 2013, в печати.