

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО
ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ СРЕДАХ

© 2021 г. С. Б. Рютин*

Институт теплофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

*e-mail: ryutin.sergey@gmail.com

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 02.04.2021 г.

Описана установка, предназначенная для исследования нестационарного теплообмена в различных жидких средах методом управляемого нагрева тонкого проволочного зонда. Главным звеном установки является быстродействующий электронный регулятор, обеспечивающий управление мощностью, рассеиваемой на зонде в зависимости от управляющего напряжения на входе регулятора. Основные параметры установки: зондом является платиновая проволока $\varnothing 20$ мкм и длиной 1 см, время реакции регулятора $\approx 1\text{--}2$ мкс, точность поддержания значения мощности 0.05%, время нагрева 1–500 мс, плотность теплового потока с поверхности зонда до 20 МВт/м^2 . Представлена методика измерений и приведен пример применения установки для исследования спинодального распада водного раствора полипропиленгликоля (ППГ-425), имеющего нижнюю критическую температуру растворения.

DOI: 10.31857/S0032816221050116

Сама по себе задача управления нагревом проволочного зонда различными способами не является новой. Как правило, способ управления (регулирование напряжения, тока, мощности, сопротивления) диктовался поставленными задачами конкретного эксперимента. Например, для исследования процессов теплообмена при гетерогенном кипении были применены стабилизаторы сопротивления проволочного зонда, что эквивалентно поддержанию постоянной температуры зонда [1]. Во многих случаях требуется поддержание постоянства мощности, рассеиваемой на нагревателе. Необходимый диапазон мощности и точность поддержания ее заданного значения зависит от условий задачи, поставленной в конкретном исследовании. В частности, применяются серийные лабораторные источники питания, способные поддерживать постоянство мощности, например, PS 8080 DT фирмы ElectroAutomatic. Подобные источники имеют точность поддержания значения мощности порядка 1% и время отклика порядка 1 мс.

Задачи, поставленные в нашем случае, потребовали обеспечить точность поддержания значения мощности на уровне 0.05% и времени отклика порядка единиц микросекунд. В качестве зонда, являющегося одновременно нагревателем и термометром сопротивления, применена платиновая проволока $\varnothing 20$ мкм. Собственное время

тепловой релаксации такого зонда имеет величину порядка 1 мкс [2]. Данное обстоятельство позволяет исследовать быстротекущие процессы, например сверхкритический теплообмен при мощном тепловыделении [3, 4], спонтанное вскипание и спинодальный распад растворов с нижней кри-

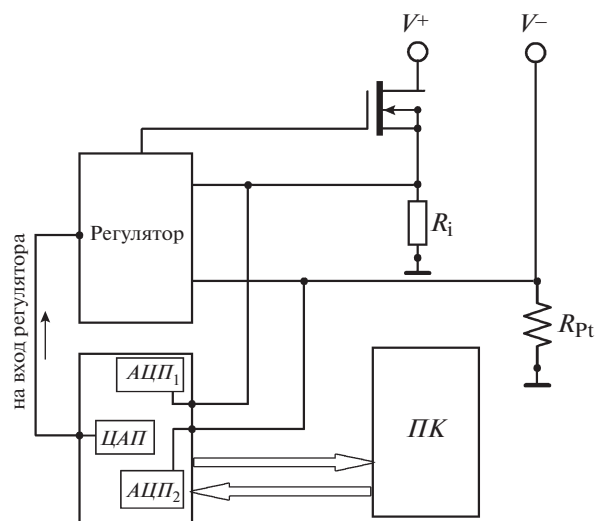


Рис. 1. Блок-схема установки. ПК — персональный компьютер.

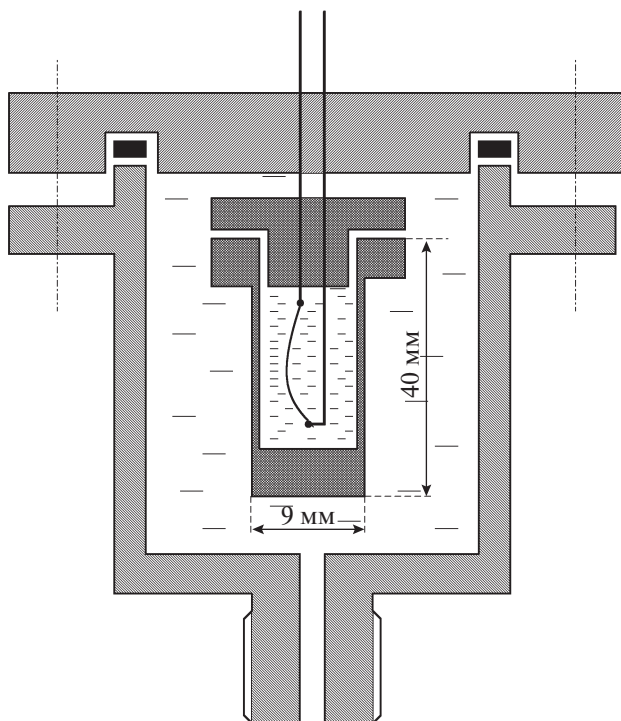


Рис. 2. Камера давления с рабочей ячейкой.

тической температурой растворения [5], коротковременно перегретых относительно линии равновесия жидкость—пар или диффузионной спинадали [6] при заданном давлении, соответственно.

Установка представляет собой аппаратно-программный комплекс, управляемый с помощью специально написанной программной оболочки. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Блок АЦП-ЦАП представляет собой два 16-битных параллельно работающих модуля АЦП (аналого-цифрового преобразователя) Е-502 фирмы LCard [7] с полосой пропускания 1.5 МГц. Они имеют 16-битные ЦАП (цифроаналоговые преобразователи), один из которых используется для формирования управляющего импульса. Основные метрологические характеристики установки таковы:

- зонд — платиновая проволока $\varnothing 20$ мкм и длиной 1 см;
- длительность греющего импульса 1–500 мс;
- точность поддержания установленного значения мощности 0.05%;
- плотность теплового потока с поверхности зонда 1–20 мВт/м²;
- предусмотрена возможность ступенчатого изменения значения мощности непосредственно в ходе импульса.

Эксперименты проводились следующим образом. Ячейка с подготовленным зондом заполнялась исследуемой жидкостью и помещалась в камеру давления. В ячейке предусмотрена эластичная мембрана для отделения гидравлической среды от исследуемой жидкости, как показано на рис. 2.

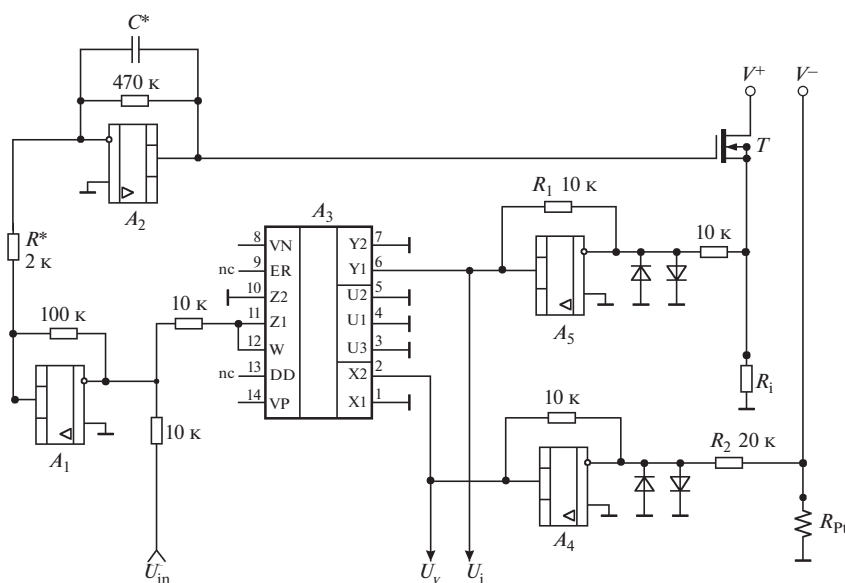


Рис. 3. Принципиальная схема регулятора, обеспечивающего управление мощностью, рассеиваемой на нагревателе — зонде, в соответствии с алгоритмом $P_{out} = kU_{in}$. A_1, A_2, A_4, A_5 — LF356A, A_3 — AD734; T — IRF540; диоды — КД522; R_i — точный токоизмерительный резистор, R_{Pt} — проволоочный зонд; V^+ и V^- присоединяются к гальванически не связанному с остальной схемой источнику питания с напряжением 90 В; U_v — падение напряжение на зонде.

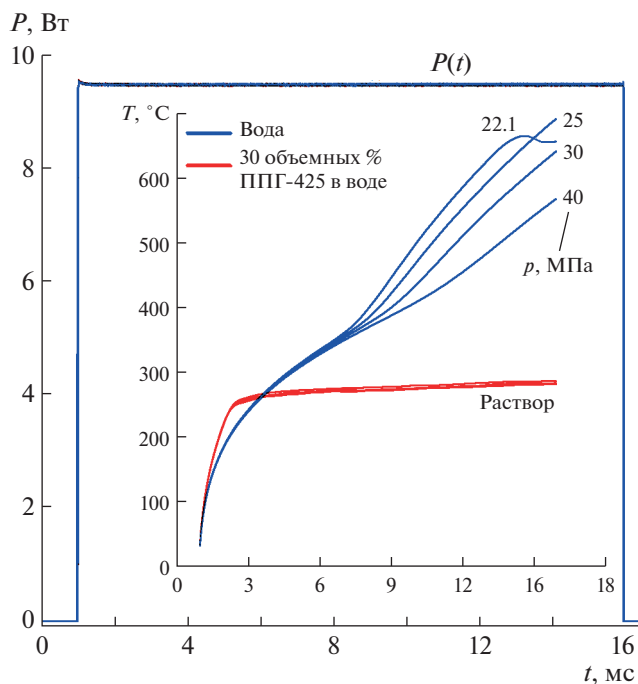


Рис. 4. Термограммы импульсного нагрева зонда в воде и 30%-м растворе ППГ-425 в воде при неизменном значении мощности $P(t) = \text{const}$, действующей в цепи зонда. На основном графике $P(t)$ представлены необработанные графики мощности всех 8 импульсов, наложенные друг на друга. На врезке показаны термограммы $T(t)$ для воды и раствора.

Риунок 2 в особых комментариях не нуждается: внутрь камеры, в которой создается избыточное давление, помещена герметичная фторопластовая ячейка в виде стаканчика с крышкой. Через крышку введены токовводы, к которым припаян зонд (R_{pt} на рис. 1). Толщина стенки в рабочей части ячейки составляет ≈ 0.1 мм, что и обеспечивает необходимую эластичность такой мембраны. Выбор в качестве материала ячейки фторопласта обусловлен высокой химической инертностью для исключения взаимодействия исследуемой жидкости с материалом ячейки.

Избыточное давление создавалось с помощью гидропресса СРР 1200-Х компании WIKI. Далее проводилось измерение начальной температуры и начального сопротивления зонда, что необходимо для расчета температуры зонда в процессе нагрева, используя стандартную градуировку платиновых термометров сопротивления. Внеся эти данные в программу сбора данных, оператор устанавливает амплитуду и длительность управляющего импульса, что эквивалентно установке заданного значения мощности. Также устанавливается необходимое значение давления. Старт нагрева производится с клавиатуры компьютера. Система сбора данных автоматически записывает изменяющиеся во времени значения падения на-

пряжения на зонде и токоизмерительном резисторе, являющиеся первичными данными. На их основе проводится расчет мощности, рассеиваемой на зонде, и изменяющегося во времени сопротивления зонда, которое пересчитывается в изменяющуюся во времени температуру зонда (термограмма). Программная оболочка сразу же по окончании импульса представляет исходные и расчетные данные в графическом виде в отдельных окнах. Вся информация записывается в память компьютера. Для корректного сопоставления теплопереноса при изменении внешнего параметра, например значения давления, работа ведется в однократном режиме. Достаточно продолжительная пауза необходима для релаксации тепла в ячейке от предыдущего импульса и для изменения внешнего параметра; она составляет ~ 2 мин.

Идея схемотехнического решения поставленной задачи создания быстродействующего регулятора мощности была подсказана в учебнике [8], где был представлен прототип генератора тока с заземленной нагрузкой. Его работа обеспечивалась дополнительным, гальванически не связанным с остальной схемой, источником питания в цепи нагрузки. Взяв за основу этот прототип, удалось создать регулятор мощности с необходимыми характеристиками. Принципиальная схема регулятора представлена на рис. 3.

Выбор операционных усилителей A_4 , A_5 должен предусматривать устойчивость работы при единичном усилении. Выбор номиналов резисторов R_1 , R_2 зависит от параметров зонда. В представленном случае зонд — платиновая проволока $\varnothing 20$ мкм и длиной 1 см. Сопротивление такого зонда при комнатной температуре составляет ~ 3 Ом, соответственно номиналы резисторов R_1 , R_2 выбраны равными 10 и 20 кОм, чтобы исключить их влияние на работу цепи “зонд — токоизмерительный резистор”. Отметим, что в неинвертирующем включении операционных усилителей A_4 , A_5 устойчивой работы петли обратной связи добиться не удалось. Причина неустойчивости кроется в конечной величине коэффициента ослабления синфазного сигнала операционных усилителей, и эта проблема усугубляется большим коэффициентом усиления в петле обратной связи регулятора (≈ 2000). Номинал конденсатора C^* подбирается из соображения наименьшей емкости, обеспечивающей устойчивую работу регулятора. При этом удастся получить достаточно малую постоянную времени $\tau^* = R^*C^*$, порядка 1–2 мкс. Кроме того, следует предусмотреть хорошую развязку по цепям питания (на схеме не показана). Использованы точные резисторы (класс 0.01), что необходимо для обеспечения хорошей повторяемости установленного значения мощности в серии измерений. A_3 — перемножитель аналоговых

сигналов с точностью 0.1%, с полосой пропускания 10 МГц и скоростью нарастания 450 В/мкс.

Найденная общая схемотехническая архитектура оказалась вполне работоспособной и легко масштабируемой под разные задачи, включая реализацию установки для измерения теплопроводности методом нестационарного нагрева проволоки (transient hot wire method в англоязычной литературе) [9]. Применение представленной установки для исследования раствора ППГ-425 в воде, импульсно перегретого относительно диффузионной спинодали, позволило обнаружить признаки спинодального распада. Его действие выразилось в резкой интенсификации теплообмена зонда с раствором, обусловленной “включением” конвективного механизма переноса тепла. На рис. 4 представлены термограммы для чистой воды и 30%-го раствора ППГ-425 в воде при одном и том же значении мощности и при одинаковых значениях давления.

На рис. 4 видно, что, начиная с некоторой температуры, термограммы раствора принимают почти горизонтальный вид, тогда как термограммы для воды уходят в область высоких температур. Такое поглощение довольно большой плотности теплового потока раствором, происходящее почти без прироста температуры, свидетельствует о резкой интенсификации теплообмена. Оценка плотности теплового потока составляет ≈ 13.5 МВт/м².

Установка показала устойчивую работу при решении разных исследовательских задач, включая метод измерения теплопроводности, перекрывая диапазон плотности теплового потока от 10 кВт/м² до 20 МВт/м², и может оказаться полезным инструментом для других применений, например для изучения характеристик пузырькового кипения теплоносителей [10].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00115.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машикин Л.Б., Жуков С.А., Ермаев С.Б.* // ПТЭ. 2007. № 1. С. 147.
<https://doi.org/10.1134/S0020441207010216>
2. *Павлов П.А., Скрипов В.П.* // Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3. № 1. С. 109.
3. *Рютин С.Б., Ямпольский А.Д., Скрипов П.В.* // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 3. С. 481.
<https://doi.org/10.7868/S0040364414030235>
4. *Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V.* // J. Eng. Thermophys. 2020. V. 29. № 1. P. 67.
<https://doi.org/10.1134/S1810232820010063>
5. *Igolnikov A.A., Rutin S.B., Skripov S.B.* // Thermochim. Acta. 2021. V. 695. P. 178815.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178815>
6. *Скрипов В.П., Файзуллин М.З.* Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамическое подобие. М.: Физматлит, 2003.
7. E-502. Многофункциональный модуль АЦП/ЦАП с интерфейсами USB&Ethernet.
<https://www.lcard.ru/products/external/e-502>
8. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Мир, 1986.
9. *Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V.* // Appl. Therm. Eng. 2016. V. 129. P. 145.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.028>
10. *Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н.* // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 18.
<https://doi.org/10.1134/S1995078016060197>