

03;05;12

Модельное исследование охлаждения изолированной металлической сферы в водных средах (закалка)

© В.И. Алешин,¹ Н.А. Долотова,¹ В.С. Анисимов²¹Институт высокомолекулярных соединений РАН,
199004 Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195261 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 26 января 2001 г. В окончательной редакции 4 июня 2001 г.)

Выполнено количественное исследование процесса охлаждения металла в воде и водополимерных охлаждающих жидкостях. Исследование проведено с помощью оригинального сферического термозонда с теплоизолированной ножкой, позволяющего приблизить условия охлаждения рабочей части зонда к условиям, соответствующим условиям охлаждения изолированной сферы. Показано, что в этом случае отдельные стадии процесса последовательно сменяют друг друга, что позволяет получить количественные характеристики каждой из них. Процесс охлаждения на всех стадиях описывается простым экспоненциальным соотношением, содержащим два параметра. Один из них имеет смысл эффективной температуры охлаждающей среды, второй является постоянной времени процесса охлаждения и однозначно связан с коэффициентом теплоотдачи. На стадии пленочного кипения численное значение эффективной температуры среды может быть значительно ниже номинальной температуры, более того, при охлаждении в холодной воде оно ниже абсолютного нуля температур, что свидетельствует об определяющем вкладе конвекции в процесс теплоотвода. Эффективная температура среды представляет собой монотонно возрастающую функцию номинальной температуры ванны и растет с ростом вязкости жидкости. Зависимость постоянной времени процесса охлаждения от температуры жидкости определяется двумя конкурирующими процессами, влияющими на конвекцию, а именно зависимостями плотности и вязкости жидкости от температуры. Влияние снижения плотности начинает превалировать при температурах жидкости выше $\approx 80^\circ\text{C}$.

Введение

Закалка является одним из распространенных технологических приемов формирования необходимых механических свойств металлического изделия. Закалка в жидких охлаждающих средах представляет собой чрезвычайно сложный процесс. Он включает в себя большое число различных физических явлений, протекающих одновременно как в закаливаемом металле, так и в охлаждающей жидкости. В металле могут иметь место различные фазовые переходы, происходит фиксация метастабильных, высокотемпературных кристаллических структур, деформирование в микрообъемах под действием внутренних микро- и макронапряжений и тому подобное. Для жидкости характерны фазовый переход из жидкого в парообразное состояние (кипение) и обратно, химическое разложение органических компонентов, развитые конвективные потоки. Во время закалки охлаждающая жидкость становится неоднородной, поле температур сложным, местами жидкость представляет собой двухфазную систему, а именно жидкость–пар или жидкость–газообразные продукты разложения (при закалке в органических маслах). Кипение жидкости может реализовываться в различных формах: в виде пузырькового и пленочного кипения или в форме движения по поверхности закаливаемого изделия так называемых фронтов смены режимов кипения. Положение осложняется тем, что закаливаемое изделие практически всегда имеет сложную

геометрическую форму, а ход охлаждения в жидкости в значительной степени определяется формой изделия, более того, одно и то же изделие может охлаждаться по-разному в зависимости от того, как оно ориентировано при погружении в жидкость.

Исследование таких сложных, взаимосвязанных процессов в комплексе по крайней мере затруднительно, зачастую же практически невозможно. В этой ситуации целесообразно проводить модельные исследования, позволяющие выделить из всего комплекса какой-либо один фактор или процесс и проанализировать его.

Настоящая работа представляет собой экспериментальное исследование процесса охлаждения в условиях, моделирующих охлаждение изолированной сферы в воде и водополимерных закалочных жидкостях. Выбор сферы небольшого размера как формы охлаждающегося тела призван обеспечить максимально однородное охлаждение, в ходе которого градиентом температур по объему металла можно пренебречь, а различные стадии процесса должны последовательно сменять друг друга (пленочное кипение, пузырьковое кипение и затем конвективный теплообмен).

Эксперимент

В работе использовался сферический полированный термозонд диаметром 20 мм с теплоизолированной ножкой и центральной термопарой, изготовленный из никеля

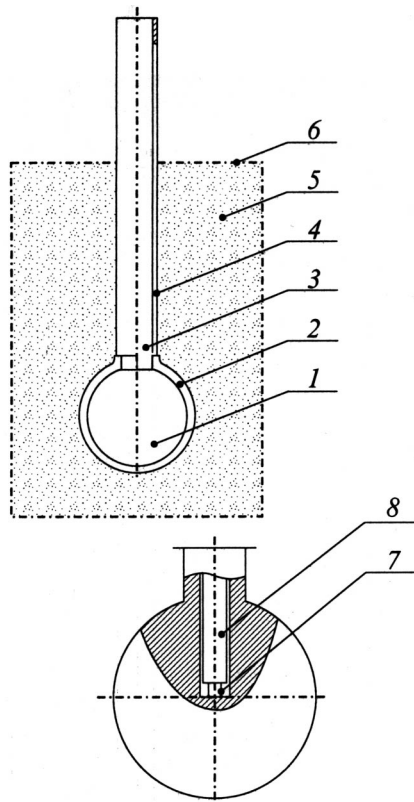


Рис. 1. Схема термозонда: 1 — рабочая (сферическая) часть термозонда; 2 — паровой пузырь, окружающий термозонд на стадии пленочного кипения; 3 — ножка термозонда; 4 — теплоизолирующая рубашка, защищающая ножку от контакта с охлаждающей жидкостью; 5 — охлаждающая жидкость; 6 — свободная поверхность жидкости; 7 — электрод термопары; 8 — керамическая трубка.

или нержавеющей стали X18H9T (рис. 1) [1]. Можно видеть, что устройство термозонда, за исключением его ножки, традиционно. Обычно ножка является элементом, вызывающим неоднородное охлаждение термозонда, что связано с повышенной теплоотдачей с ее поверхности (низкая теплоемкость и высокое отношение площади к объему). В нашем случае поверхность ножки 3 изолирована от контакта с охлаждающей жидкостью 5 с помощью тонкой защитной трубки 4. Это простое приспособление позволяет полностью исключить интенсивный теплоотвод с поверхности ножки и приблизить условия охлаждения рабочей части термозонда 1 к условиям, характерным для изолированной сферы. Поверхность сферы для стабилизации ее состояния окислена выдержкой термозонда в окислительной атмосфере при температуре 1100°C в течение 1 h. Термопара — хромель-алюмель с разнесенными спаями (7,8 на рис. 1). Начальная температура зонда для основной массы опытов 695°C.

Установка для исследования по своей схеме так же традиционна. Термозонд нагревается в трубчатой печи до температуры, на 15°C превышающей начальную температуру опыта, после чего помещается над кю-

ветой с исследуемой жидкостью. После остывания до начальной температуры опыта термозонд с постоянной скоростью, равной ≈ 50 mm/s, опускается в кювету. Изменение температуры термозонда в процессе остывания регистрируется электронным самопишущим потенциометром типа КСП4. Объем кюветы для исследуемой жидкости 800 ml, температура жидкости поддерживалась на заданном уровне электронным регулятором с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Непосредственно перед измерениями магнитная мешалка, выравнивающая поле температур в жидкости, выключалась, измерения производились при неподвижной жидкости.

В качестве модельных охлаждающих сред были использованы дистиллированная вода, раствор натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы с концентрацией 1% и дисперсии супервлагоабсорбента на основе частично замещенного шитого сополимера полиакриловой кислоты и полиакриламида со степенью набухания 1000 g/g [2,3] в различной концентрации. Выбор данных объектов определялся следующими соображениями. Карбоксиметилцеллюлоза, как и полиакриловая кислота, их соли и сополимеры достаточно широко используются в качестве загустителей для создания водополимерных закалочных жидкостей [4]. Использование в качестве загустителей супервлагоабсорбентов — редко шитых сополимеров (гелей) полиакриловой кислоты со степенями набухания в воде до 6000 g воды на 1 g полимера в виде дисперсий геля в воде позволяет снизить концентрацию полимера более чем на порядок, вплоть до 0.01% [5]. Выгоды от снижения концентрации полимера в закалочной жидкости очевидны и в пояснении не нуждаются. Для закалки используется водная дисперсия дробленого геля с частицами, имеющими в набухающем состоянии размер несколько миллиметров и менее. Такая дисперсия в больших объемах по своим реологическим свойствам похожа на вязкотекучую жидкость, вязкость которой в 10–100 раз выше вязкости раствора линейного полимера той же концентрации.

Результаты и обсуждение

Перед тем как переходить к изложению количественных результатов измерений, опишем качественную картину процесса охлаждения термозонда с теплоизолированной ножкой. Если температура ванны выше 10–15°C, то уже в момент погружения раскаленного шарика в воду происходит формирование паровой рубашки толщиной около 1 mm, окружающей рабочую (сферическую) часть зонда (в более холодной воде формирования сколь угодно стабильной паровой рубашки не происходит). Контакта жидкости с поверхностью шарика в процессе погружения не возникает. В связи с тем, что теплоемкость теплоизолирующей трубки, защищающей ножку от охлаждения и контакта с жидкостью, мала, температура ее существенно снижается уже во время ”подстуживания” зонда перед началом опыта. Поэтому после погру-

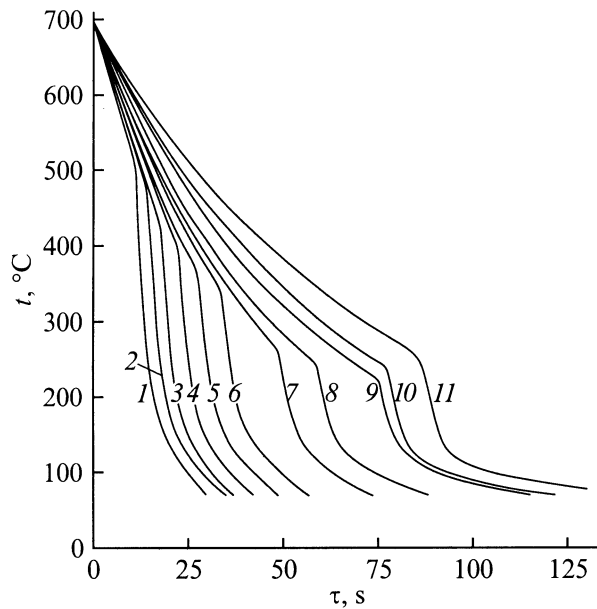


Рис. 2. Кривые охлаждения термозонда в дисперсиях супервлагоабсорбента различной концентрации при температуре $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Концентрация полимера в процентах: 1 — 0.1, 2 — 0.08, 3 — 0.07, 4 — 0.06, 5 — 0.05, 6 — 0.045, 7 — 0.04, 8 — 0.035, 9 — 0.03, 10 — 0.025, 11 — 0.02.

жения шарика в жидкость последняя вступает в контакт с тепловой защитой ножки, в результате чего паровой пузырь оказывается изолирован от атмосферы и сброса пара не происходит. При температурах воды выше 40°C паровая рубашка достаточно устойчива (время жизни более 10 s), на поверхности пара невооруженным глазом можно видеть поверхностные волны. Разрушение паровой рубашки при охлаждении зонда происходит взрывообразно, практически сразу на всей поверхности сферы и сопровождается громким хлопком (небольшой переходный участок наблюдается лишь при охлаждении в воде, имеющей температуру, близкую к температуре кипения, или растворах с высокой концентрацией полимера). Подобное поведение свидетельствует о высокой однородности процесса охлаждения. Никакой промежуточной стадии между режимами пленочного и пузырькового кипения нет. Длительность стадии пузырькового кипения невелика, она лежит в пределах нескольких секунд. Переход от пузырькового кипения к конвективному теплообмену слегка размыт, и некоторое время (1–2 s) на поверхности термозонда могут сосуществовать участки, относящиеся к разным стадиям охлаждения. Основная причина — разные условия охлаждения шарика в его нижней части, омываемой восходящим потоком холодной жидкости, и верхней его половины, охлаждаемой уже нагретой жидкостью с более высокой температурой.

Примеры кривых охлаждения термозонда дисперсиями супервлагоабсорбента в дистиллированной воде с номинальной температурой ванны $t_0 = 20 \pm 0.2^\circ\text{C}$, содержащими полимер в различной концентрации, приведены на

рис. 2. Обратим внимание на характерную особенность кривых охлаждения: они имеют излом, соответствующий взрывообразному переходу от пленочного кипения к пузырьковому. Исключение составляет лишь кривая 11, относящаяся к дисперсии с максимальной концентрацией геля, когда количество воды в межчастичном пространстве минимально и практически вся вода находится в частицах геля в связанном состоянии. Незначительная размытость этого излома объясняется запаздыванием показаний термопары из-за перепада температур между поверхностью шарика и его центром. Рис. 3 иллюстрирует воспроизводимость процесса охлаждения в дистиллированной воде в последовательных опытах при температуре ванны $t_0 = 65 \pm 1^\circ\text{C}$. Можно видеть, что воспроизводимость кривых охлаждения на стадии пленочного кипения достаточно высока, отдельные кривые практически сливаются. Сдвиг кривых по оси времени позволяет совместить участки пузырькового кипения и конвективного теплообмена. Основной разброс в результате измерений вносит некоторая стохастичность момента перехода от пленочного к пузырьковому кипению. Невоспроизводимость момента перехода определяется всем комплексом неучтенных факторов эксперимента, главными из которых являются состояние окисной пленки на поверхности термозонда и концентрации растворенных в воде газов. Эта невоспроизводимость сравнительно невелика, разброс длительностей пленочного кипения, как правило, лежит в пределах $\pm 10\%$. Рост

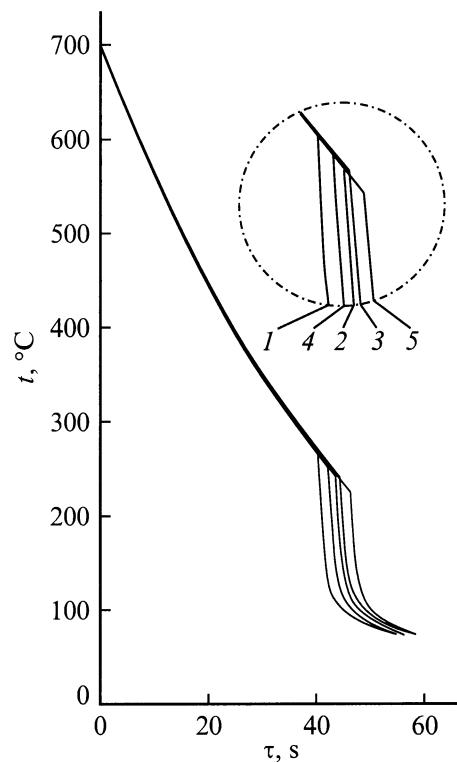


Рис. 3. Воспроизводимость кривых охлаждения на примере дистиллированной воды с температурой $60 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Цифры у кривых — номера последовательных опытов.

температуры ванны t_0 приводит к замедлению охлаждения, начальные скорости охлаждения в воде в области пленочного кипения снижаются при росте t_0 от 25 до 97°C приблизительно в два раза. В то же время общее время охлаждения от начальной температуры зонда 695°C до 200°C растет почти в 16 раз, что говорит об определяющей роли именно длительности стадии пленочного кипения и роста стабильности паровой пленки при повышении температуры воды.

Зависимость температуры термозонда от времени $t(\tau)$ на всех стадиях процесса охлаждения, а именно при пленочном и пузырьковом кипении и конвективном теплообмене, может быть с высокой точностью аппроксимирована экспоненциальным соотношением с постоянными в пределах стадии параметрами

$$t = \Delta t_{\text{eff}}^i \exp(\tau/\tau_0) + t_{\text{eff}}. \quad (1)$$

Здесь t_{eff} — эффективная температура среды, Δt_{eff}^i имеет смысл начальной эффективной разности температур между термозондом и жидкостью, $\Delta t_{\text{eff}}^i = (t_i - t_{\text{eff}})$, t_i — начальная температура термозонда; напомним, что в наших опытах $t_i \approx 695^\circ\text{C}$, а τ_0 — параметр, имеющий размерность времени. Расхождение между величинами, рассчитанными по (1), и экспериментальными данными обычно не превышает $\pm 2^\circ\text{C}$, лишь в редких случаях отклонение превышает $\pm 3^\circ\text{C}$, что также лежит в пределах погрешности измерений.

Аппроксимацию кривых, как правило, выполняли с помощью программы «Origin» после сканирования кривых охлаждения и оцифровки их в программе «Windig». В этом случае подгонка происходила по обоим параметрам уравнения (1), а именно t_{eff} и τ_0 . Аппроксимацию ряда кривых произвели вручную, в этом случае подгоночным был только параметр t_{eff} . Его значение подбирали так, чтобы после перестроения данных в координатах $\ln[(t - t_{\text{eff}})/(t_i - t_{\text{eff}})]$ в зависимости от τ они ложились на прямую линию. Совпадение между результатами ручной и компьютерной аппроксимации хорошее. Из обработки исключались, во-первых, небольшой участок кривой охлаждения вблизи точки излома при переходе от пленочного к пузырьковому кипению и, во-вторых, участок температур от 105 до 100°C, соответствующий переходу от пузырькового кипения к конвективному теплообмену, когда, как уже говорилось, на поверхности термозонда в течение 1–2 с могли сосуществовать разные стадии процесса охлаждения.

Как уже говорилось, процесс охлаждения на любой из стадий с достаточной степенью точности описывается соотношением (1) с постоянными в пределах стадии параметрами. Это утверждение не означает, что условия теплообмена остаются действительно неизменными от начала до конца любой из стадий охлаждения. Скорее, это значит, что изменение условий достаточно мало и может быть исследовано лишь после существенного увеличения точности измерений, так чтобы погрешность была по крайней мере на порядок меньше, чем в наших

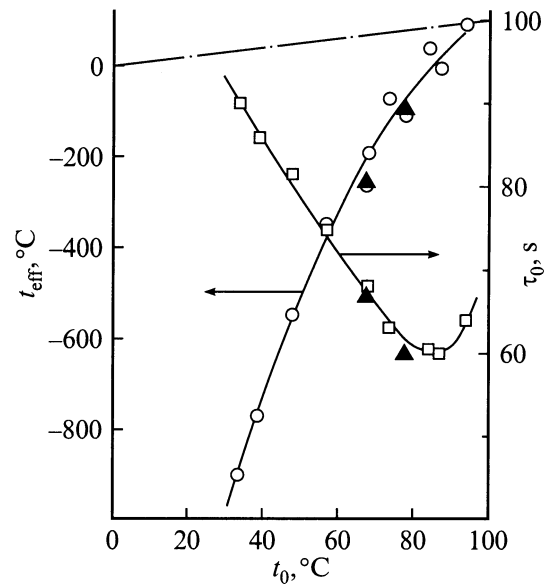


Рис. 4. Зависимости t_{eff} и τ_0 от температуры ванны t_0 для дистиллированной воды на стадии пленочного кипения. Треугольники — параметры, рассчитанные по кривым охлаждения термозонда из нержавеющей стали. Штрихпунктир — равенство эффективной и номинальной температур ванны.

опытах. Такая точность измерений достаточно трудно достижима.

Зависимости параметра τ_0 и эффективной температуры среды t_{eff} от номинальной температуры ванны t_0 для дистиллированной воды в различных режимах охлаждения — пленочное кипение, пузырьковое кипение и конвективный теплообмен представлены на рис. 4–6 соответственно.

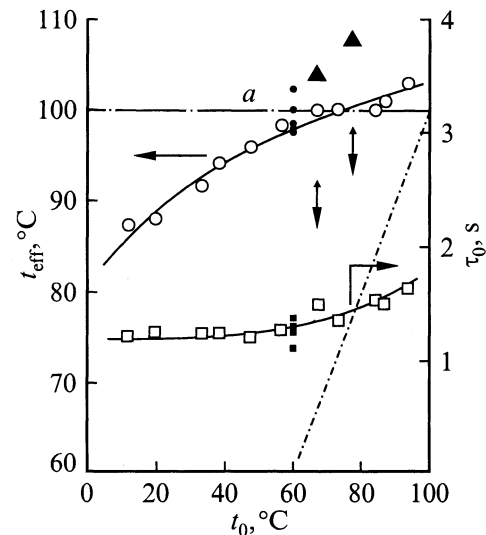


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для стадии пузырькового кипения. Точки и квадраты — параметры, рассчитанные по кривым, приведенным на рис. 3. Штриховая линия a — температура кипения воды.

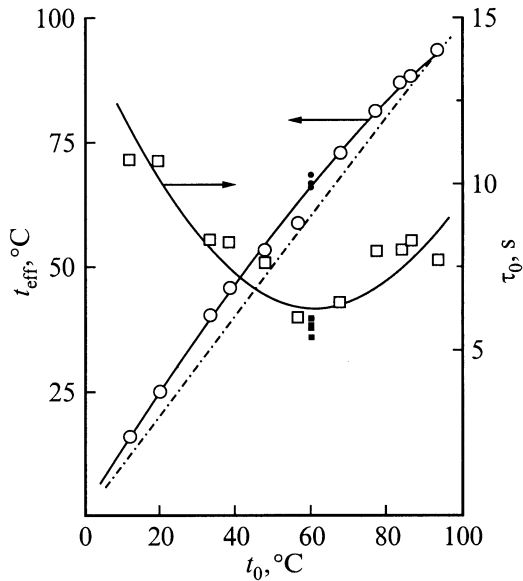


Рис. 6. То же, что на рис. 4 для стадии конвективного теплообмена.

Можно видеть, что зависимость t_{eff} от t_0 для всех стадий процесса охлаждения имеет качественно сходный характер и представляет собой монотонно возрастающую функцию, что и следовало ожидать. Бросается в глаза значительная разница между t_{eff} и t_0 для первых двух стадий процесса, значения этих величин сближаются только при $t_0 \rightarrow 100^\circ\text{C}$, т.е. при приближении температуры охлаждающей ванны к температуре кипения. Равенство t_{eff} и t_0 показано на рис. 4–6 штрихпунктиром. Наиболее существенные различия между t_{eff} и t_0 наблюдаются на стадии пленочного кипения при охлаждении в холодной воде.

Попытаемся прояснить физический смысл параметра t_{eff} — эффективной температуры среды, одного из двух параметров уравнения (1), и природу различия между t_{eff} и t_0 . Для этого схематически рассмотрим распределение температур в среде вокруг термозонда при охлаждении, например, на стадии пленочного кипения (рис. 7). Логично считать, что температура поверхности раздела пар–жидкость практически не зависит от температуры жидкости вдали от термозонда (температуры ванны t_0). Она должна быть близка к температуре кипения, точнее, к температуре максимального перегрева воды t^* . Номинальная температура жидкости в ванне контролирует спад температуры по мере удаления от поверхности парового пузыря. В отсутствие конвекции спад температуры в какие-то моменты времени может быть условно представлен кривыми 1. Конвекция меняет распределение температур, заметно уменьшая ширину зоны нагретой жидкости (кривая 2). Естественно, из-за того что конвекция реализуется в виде струйных потоков, другим эффектом конвекции будет возникновение неравномерного распределения температур, но этот эффект мы обсуждать не будем. Представляется, что

на значительном участке, прилегающем к поверхности парового пузыря, кривая 2 будет близка к кривой 3, передающей распределение температур в толще жидкости в условиях отсутствия конвекции, но имеющей температуру $t_{\text{eff}} < t_0$. Таким образом, разумно считать, что действие конвективных потоков в первом приближении может быть учтено введением эффективной температуры жидкости t_{eff} . Чем интенсивнее конвекция, тем больше должна быть разница $(t_{\text{eff}} - t_0)$. Движущей силой конвекции является падение плотности жидкости с ростом температуры. Чем больше разность плотностей, однозначно связанная с градиентом температур по объему жидкости, тем интенсивнее конвективные потоки. Отсюда следует, что рост температуры жидкости t_0 должен приводить к снижению интенсивности конвективных потоков и к сближению t_{eff} и t_0 , что наблюдается в опыте (рис. 4). Обращают на себя внимание чрезвычайно низкие значения t_{eff} при $t_0 \rightarrow 0^\circ\text{C}$. В этом случае $t_{\text{eff}} \ll 0$ (К), т.е. ниже абсолютного нуля температур, что свидетельствует об определяющей роли конвекции при охлаждении через паровую пленку в холодной воде. Вторым фактором, от которого зависит развитие конвективных потоков, является вязкость жидкости. С ростом температуры жидкости вязкость падает, таким образом, этот фактор должен замедлять темп снижения конвекции с ростом температуры жидкости.

При охлаждении в условиях пузырькового кипения распределение температур вблизи зонда существенно меняется. Интенсивное перемещение пузырьков пара и перемешивание жидкости ведут к формированию объема горячей жидкости, окружающей термозонд и имеющей температуру заметно выше, чем номинальная темпе-

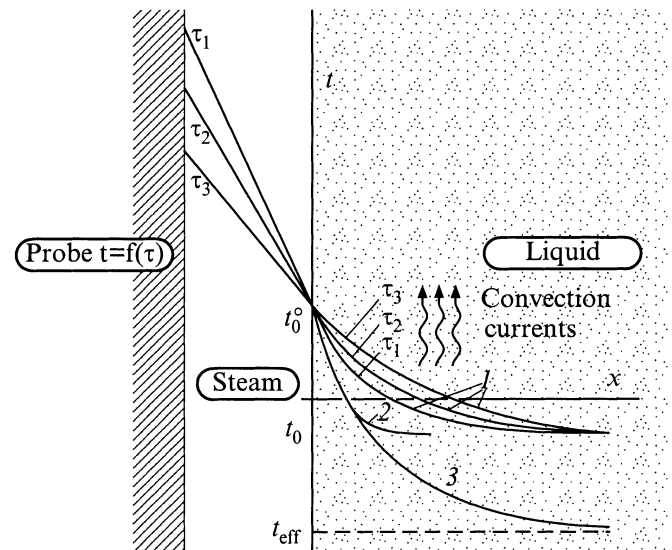


Рис. 7. Схема распределения температур в зоне прилегающей к термозонду на стадии пленочного кипения: 1 — распределение температур в последовательные моменты времени при отсутствии конвекции, 2 — то же при наличии конвекции, 3 — распределение температур при отсутствии конвекции в среде с температурой равной t_{eff} .

ратура ванны. Как следствие этого, растет и t_{eff} (рис. 5). По этой причине в режиме пузырькового кипения $t_{\text{eff}} > t_0$ и достаточно близка к температуре кипения воды, а при $t_0 \rightarrow 100^\circ\text{C}$ имеет место перегрев жидкости вблизи термозонда и $t_{\text{eff}} > 100^\circ$. Высокие значения t_{eff} не означают, что роль конвекции на этой стадии процесса сводится к нулю. Подчеркнем еще раз, что реальная температура в прогретой зоне вблизи термозонда превышает эффективную, но степень превышения не столь высока, как на стадии пленочного кипения. Перегрев воды выше температуры кипения в режиме пузырькового кипения вблизи термозонда можно обнаружить и непосредственно, с помощью термомпары.

В режиме конвективного теплообмена, как и следовало ожидать, происходит снижение температуры области окружающей термозонд и прогретой на предыдущей стадии охлаждения, t_{eff} падает и во всем диапазоне температур лишь на несколько градусов превышает номинальную температуру ванны (рис. 6).

Второй параметр уравнения (1), а именно τ_0 — величина, имеющая размерность времени и смысл постоянной времени процесса теплообмена, и напрямую связан с коэффициентом теплоотдачи сферы малого радиуса (перепадом температур по радиусу сферы можно пренебречь) соотношением [6]

$$\tau_0 = \frac{\rho c R}{3\alpha},$$

где α — коэффициент теплоотдачи, ρ — плотность материала, c — удельная теплоемкость, R — радиус сферы.

Как уже говорилось, в нулевом приближении можно считать, что в каждом из режимов τ_0 и соответственно коэффициент теплоотдачи имеют характерное значение, которое довольно слабо меняется при изменении t_0 (рис. 4–6). Для пленочного кипения характерны значения $\tau_0 = 60\text{--}90\text{ s}$, причем с ростом t_0 постоянная времени процесса $\tau_0(t_0)$ сначала падает, а вблизи температуры кипения воды проходит через слабый минимум. Столь большие значения τ_0 определяются сравнительно низкой скоростью передачи тепла через паровую пленку. Снижение τ_0 свидетельствует, что коэффициент теплоотдачи растет с ростом температуры ванны. Это не означает, что скорость охлаждения растет с ростом температуры ванны. Рост коэффициента теплоотдачи значительно перекрывается уменьшением эффективной разности температур между телом и охлаждающей жидкостью. Можно предполагать, что причиной подобного поведения τ_0 является снижение вязкости воды с ростом температуры, ведущее к интенсификации конвективных потоков. С другой стороны, рост температуры воды ведет к снижению максимально возможной разности плотностей неоднородно нагретых объемов. Опыт показывает, что при температурах ниже 80°C суммарный эффект оказывается в пользу "вязкости", поскольку плотность воды от температуры зависит сравнительно слабо. Анализ показывает, что температурная зависимость τ_0 в зоне

низких температур следует обычному экспоненциальному соотношению, оценка кажущейся энергии активации дает величину приблизительно в два раза ниже, чем для температурной зависимости вязкости воды.

Самые низкие значения τ_0 , что вполне понятно, наблюдаются в режиме пузырькового кипения, когда имеет место интенсивное перемешивание жидкости. Характерные величины для никелевого термозонда лежат в диапазоне 1–2 s, а для термозонда из нержавеющей стали, имеющей низкую теплопроводность, равны 3–4 s. Отметим, что зависимость измеренных значений τ_0 от материала термозонда ощущается только в режиме пузырькового кипения. Функция $\tau_0(t_0)$ в режиме пузырькового кипения является слабо возрастающей, что в определенной степени перекликается с поведением этой зависимости при пленочном кипении в области высоких температур ванны, $t_0 > 70^\circ\text{C}$, если обратить внимание на то, что при пузырьковом кипении t_{eff} также превышает 80°C .

Для охлаждения в режиме конвективного теплообмена характерны промежуточные значения τ_0 , равные 6–11 s. Качественно зависимость τ_0 от (t_0) имеет тот же характер, что и зависимость для стадии пленочного кипения, относительный рост τ_0 начинается при $t_0 > 70^\circ\text{C}$.

Представленные выше данные позволяют высказать априорные суждения о влиянии загущающих добавок к воде на параметры кривой охлаждения. Из общих соображений ясно, что любая добавка, увеличивающая вязкость и подавляющая конвективные потоки, будет вести к локализации процесса теплообмена и росту локальных температур вблизи охлаждающего тела. Это должно привести, в числе прочего и к росту t_{eff} . В то же время понятно, что загущающие добавки можно разделить на два класса, а именно на растворы и дисперсии. Основное отличие дисперсии состоит в том, что в межчастичном пространстве находится чистая вода, имеющая низкую вязкость и способная к переносу тепла путем конвекции.

Влияние добавки линейного полимера на параметры кривой охлаждения исследовано нами на примере 1%-го раствора натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (рис. 8 и 9). Можно видеть (рис. 8), что в этом случае во всех режимах охлаждения $t_{\text{eff}} > t_0$, как и ожидалось. При пленочном кипении и конвективном теплообмене зависимости эффективной температуры от температуры ванны представляют собой практически прямые линии. С ростом t_0 они стремятся к температуре кипения воды и сближаются с прямой $t_{\text{eff}} = t_0$. В режиме пузырькового кипения $t_{\text{eff}} > 90^\circ\text{C}$ и слабо меняется с ростом t_0 . Это свидетельствует о формировании локальной высоконагретой области, температура которой практически не зависит от номинальной температуры охлаждающей ванны. Зависимость τ_0 от t_0 для всех режимов охлаждения слаба (рис. 9). Для режима пленочного кипения наблюдается незначительный минимум τ_0 при $40\text{--}45^\circ\text{C}$. Это соответствует $t_{\text{eff}} \geq 60^\circ\text{C}$, что несколько ниже, чем в случае дистиллированной воды (80°C). Абсолютные значения τ_0 близки к значениям, наблюдающимся для

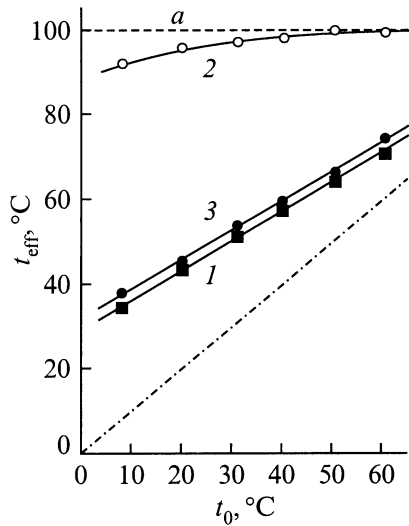


Рис. 8. Зависимость t_{eff} от температуры ванны t_0 при охлаждении в однопроцентном растворе карбоксиметилцеллюлозы: 1 — пленочное кипение, 2 — пузырьковое кипение, 3 — конвективный теплообмен. Штрихпунктир — равенство эффективной и номинальной температур ванны. Штриховая линия a — температура кипения воды.

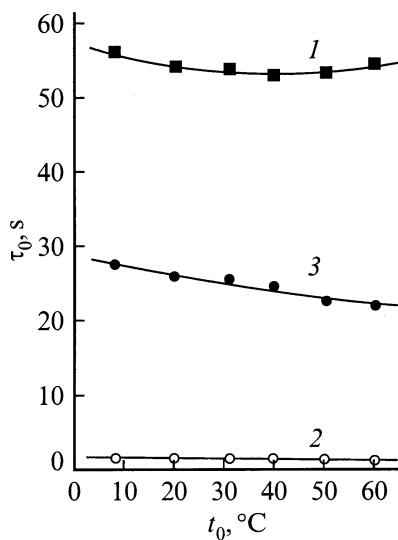


Рис. 9. Зависимость τ_0 от температуры ванны t_0 при охлаждении в однопроцентном растворе карбоксиметилцеллюлозы: 1 — пленочное кипения, 2 — пузырьковое кипение, 3 — конвективный теплообмен.

воды при высоких температурах ванны, но ниже на 5–6 с. Этот несколько неожиданный результат, очевидно, связан с особенностями влияния полимерной добавки на характеристики парового пузыря, окружающего термозонд, в связи с чем рост вязкости жидкости не привел к увеличению толщины паровой пленки и росту τ_0 . Выяснение вопроса, с какими физическими характеристиками раствора связан этот эффект, требует проведения дополнительных исследований. Возможно,

определенную роль может играть изменение характера струйных конвективных потоков вблизи стенок парового пузыря, снижение турбулентности в микрообъемах. Обращает на себя внимание и тот факт, что рост вязкости жидкости не привел к какому-либо повышению τ_0 в режиме пузырькового кипения: $\tau_0 = 1.2\text{--}1.5\text{ s}$, как и для чистой воды. Возможно, причина этого имеет ту же природу, что и отмеченное выше снижение τ_0 при пленочном кипении и связано с изменением условий на границе парового пузыря. В то же время в режиме конвективного теплообмена имеет место практически двукратное увеличение τ_0 по сравнению с величинами, характерными для чистой воды, что представляется совершенно естественным следствием роста вязкости. С ростом температуры τ_0 падает, что отражает снижение вязкости раствора с температурой.

Рассмотрим теперь влияние, оказываемое на параметры кривой охлаждения, добавки супервлагоабсорбента в различной концентрации (рис. 10, 11). Эти рисунки показывают, что рост концентрации полимера ведет к изменениям параметров кривой охлаждения, сходным с изменениями, вызванными ростом температуры охлаждающей ванны (ср. рис. 10 и 4–6), что можно объяснить постепенной локализацией процесса охлаждения и ростом температуры прогретой зоны вблизи термозонда. В режиме пленочного кипения постоянная времени τ_0 близка к величинам, характерным для воды при умеренных температурах 55–65 с. Можно было ожидать, что при низкой концентрации полимерной добавки и температуре ванны около 20°C, для которых имеют место весьма низкие значения $t_{\text{eff}} < -200^\circ\text{C}$, будут наблюдаться более высокие значения $\tau_0 > 70\text{ s}$, характерные для охлаждения в холодной воде. Возможная причина различий значений τ_0 может быть связана с влиянием продуктов деструкции полимера на поверхностное

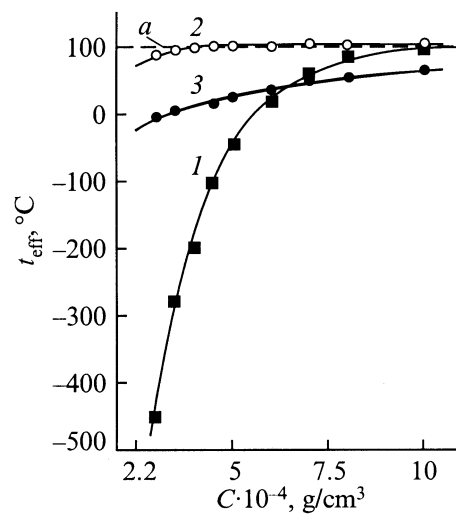


Рис. 10. Зависимость t_{eff} от C -концентрации полимера для дисперсий супервлагоабсорбента в воде: 1 — пленочное кипение, 2 — пузырьковое кипение, 3 — конвективный теплообмен. Штриховая линия a — температура кипения воды.

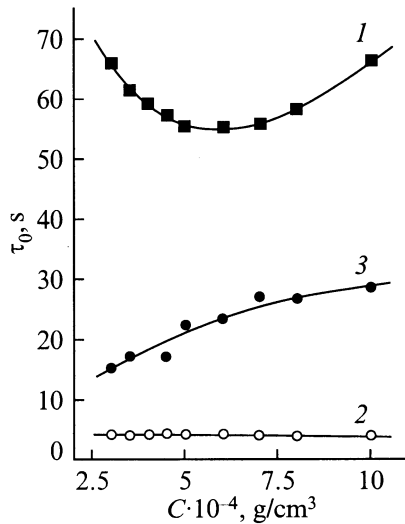


Рис. 11. Зависимость τ_0 от C -концентрации для дисперсий супервлагоабсорбента в воде: 1 — пленочное кипение, 2 — пузырьковое кипение, 3 — конвективный теплообмен.

натяжение на границе жидкость–пар. При конвективном теплообмене величины τ_0 близки к тем, что наблюдаются для раствора линейного полимера, и растут с ростом концентрации полимерной добавки. Это означает, что рост вязкости с ростом концентрации полимера перекрывает снижение вязкости, вызванное ростом локальной температуры и соответственно t_{eff} , из-за постепенной локализации процесса охлаждения.

Заключение

Итак, представленные данные свидетельствуют о плодотворности принятого нами модельного подхода к исследованию процесса закалки. Было показано, что процесс охлаждения на любой из стадий может быть описан простым экспоненциальным соотношением с двумя параметрами. Подобное соотношение характерно для теплообмена в условиях конвекции [5]. Существенно, что при точности аппроксимации эксперимента, равной $\pm 3^\circ\text{C}$, параметры уравнений в пределах стадии можно считать постоянными. Первый параметр имеет размерность времени и однозначно связан с коэффициентом теплоотдачи. Второй параметр имеет размерность температуры и физический смысл эффективной температуры охлаждающей ванны. Конвекция приводит к тому, что эффективная (кажущаяся) температура ванны оказывается ниже, чем реальная температура жидкости вблизи охлаждающегося тела. Особенно большая разница наблюдается на стадии пленочного кипения, когда еще не сформировалась объемная зона нагретой жидкости. Интенсивное формирование этой зоны происходит на стадии пузырькового кипения.

При охлаждении в условиях закалки детали сложной формы важным фактором, определяющим ход всего про-

цесса охлаждения, является неоднородность процесса, т.е. сосуществование на разных участках поверхности различных стадий: пленочного кипения, пузырькового кипения и конвективного теплообмена. Логично считать, что этот общий случай может быть рассмотрен в первом приближении как сумма вкладов индивидуальных процессов с весовыми коэффициентами, равными доле поверхности детали, на которой реализуется тот или иной процесс (без учета неравномерности распределения температур по объему металла).

В заключение отметим, что проведенные опыты позволили предложить эффективную схему количественного описания кривых охлаждения. Негативным моментом является отсутствие критерия перехода от пленочного к пузырьковому кипению, что усугубляется зависимостью температуры этого перехода от многих трудно контролируемых факторов. Одним из наиболее важных среди них является состояние поверхности закаливаемой детали, в частности толщина и тонкое строение окисной пленки. Замечено, что рост толщины этой пленки приводит к снижению стабильности пленочного кипения и росту температуры срыва.

Список литературы

- [1] *Аэро Э.Л., Анисимов В.С., Алешин В.И., Голиханданов Е.Л.* // Патент РФ. № 2039092. Приоритет 11.04.90. БИ. № 19.09.07.95.
- [2] *Буянов А.Л., Ревельская Л.Г., Петропавловский Г.А.* // ЖПХ. 1989. Т. 62. Вып. 8. С. 1854–1859.
- [3] *Буянов А.Л., Ревельская Л.Г., Петропавловский Г.А.* // ЖПХ. 1992. Т. 65. Вып. 1. С. 181–188.
- [4] *Ежов В.М.* Закалочные среды при термической обработке металлов. Технология, организация производства и управления. М.: НИИЭ информэнергомаш, 1983. 30 с.
- [5] *Буянов А.Л., Ревельская Л.Г., Анисимов В.С. и др.* // Патент РФ. № 1826527. Приоритет 13.10.92.
- [6] Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник/ Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.