

УДК 665.765.035

ОБРАЗОВАНИЕ И РОСТ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ В РАСТВОРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ-ПОЛЯ И АНАЛОГИЯ С КОНДЕНСАЦИЕЙ ПЕРЕОХЛАЖДЁННОГО ПАРА

К. В. Коваленко, С. В. Кривохижа, А. А. Рухадзе¹, Л. Л. Чайков, У. Юсупалиев¹

Экспериментально обнаружено образование и рост коллоидных частиц в растворе присадки в масляной основе под действием кратковременного СВЧ-облучения раствора, во время которого не происходит нагревания раствора. Это аналогично известному явлению образования и роста коллоидных частиц при продолжительном нагревании. Показано сходство процессов образования и роста коллоидных частиц присадки в таком растворе с процессом роста капель жидкости в переохлаждённом паре.

Явление образования зародышей новой фазы B внутри фазы A при потере последней термодинамической стабильности известно давно. Оно описано, в частности, в известных работах Френкеля и Лифшица–Слёзова [1–3]. Классическими примерами образования и роста таких зародышей являются образование капель жидкости в переохлаждённом паре или образование капель одной из фаз при расслаивании раствора на две фазы.

Первоначально такой зародыш образуется в результате тепловых флуктуаций плотности (или концентрации), благодаря тому, что эти флуктуации резко усиливаются в условиях переохлаждения. При этом изменение термодинамического потенциала $\Delta\Phi$ оказывается зависящим от радиуса зародыша r :

$$\Delta\Phi = (\mu_B - \mu_A)N_B + 4\pi r^2\sigma = (\Delta\mu/\nu_B) \cdot 4\pi r^3/3 + 4\pi r^2\sigma. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\mu = (\mu_B - \mu_A) < 0$, μ_B, μ_A – химические потенциалы фаз B и A в расчёте на одну молекулу, N_B – число молекул в зародыше, σ – коэффициент поверхностного натяжения

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

межфазной границы, ν_B – объём, приходящийся на одну молекулу в зародыше фазы B . Функция $\Delta\Phi(r)$ имеет максимум при

$$r = r^* = 2\sigma\nu_B/|\Delta\mu|, \quad (2)$$

и поэтому зародыши, имеющие размер меньше r^* , уменьшаются и исчезают, а зародыши с $r > r^*$ растут за счёт диффузионного потока вещества j_D как из объёма фазы A , так и с поверхности мелких зародышей [3]:

$$j_D = 4\pi r^2 D \Delta c / r, \quad (3)$$

где D – коэффициент самодиффузии молекул в фазе A , а Δc – разность концентрации молекул в объёме фазы A и у поверхности частицы фазы B . Тогда скорость роста частицы

$$dr/dt = D \Delta c \nu_B / r. \quad (4)$$

Менее известно явление образования и роста коллоидных частиц присадки в масле. А между тем это явление, судя по всему, с точки зрения термодинамики и кинетики роста частиц есть проявление того же механизма. Опишем последнюю систему подробнее.

Современные технические масла состоят из синтетической или минеральной основы (базового масла) и небольшого количества присадок, улучшающих их эксплуатационные свойства, такие как снижение трения и износа, химическая и коллоидная стабильность, уменьшение пенообразования и т. д. Из практики известно, что для получения готового масла смесь основы и присадок необходимо прогреть, обычно при перемешивании, до температуры $60 - 100^\circ \text{C}$ в течение $5 - 50$ часов.

Ранее части авторов настоящей работы удалось экспериментально показать, что при последнем процессе происходит образование и рост больших (> 20 нм) ассоциатов или коллоидных частиц присадки в масле [4]. Эти частицы состоят на самом деле не только из присадки, но включают в себя также и основу, поэтому правильнее называть их коллоидными образованиями (КО). По-видимому, присадки обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства масел тогда, когда находятся в основе именно в виде коллоидного, а не истинного раствора.

До последнего времени никто не пытался с помощью прямых измерений размеров ассоциатов присадок в масле экспериментально исследовать ни стабильность масла, ни процесс образования коллоидного раствора из смеси веществ при приготовлении масла. Единственная попытка части авторов настоящей работы в этом направлении [4]

прошла незамеченной. Вопросы о механизме и скорости роста этих КО и о связи их размеров со стабильностью и эксплуатационными характеристиками масла очень важны с прикладной точки зрения, однако для нас сейчас интереснее, насколько образование и рост этих КО аналогичны образованию зародышей новой фазы в термодинамически нестабильной системе.

Любой коллоидный раствор, в котором наблюдается рост КО со временем, пусть и очень медленный, является термодинамически неустойчивым. Устойчивость такого раствора на практике обеспечивается просто очень большим характерным временем агрегации, то есть укрупнения коллоидных частиц (в нашем случае – КО). Механизм роста КО присадок в масле точно до сих пор не известен. В коллоидной химии различают обычно три возможных механизма агрегации: диффузионный поток из раствора и от мелких коллоидных частиц к крупным (изотермическая перегонка), слияние мелких капель жидкой примеси в более крупные (коалесценция) и слипание коллоидных частиц при столкновениях (коагуляция).

Изотермическая перегонка в точности соответствует образованию зародышей жидкости в переохлаждённом или пересжатом паре при условии замены коэффициента самодиффузии молекул фазы A на коэффициент диффузии молекул присадки в основе. Коалесценция аналогична изотермической перегонке в смысле термодинамики, а в смысле кинетики аналогична коагуляции. Аналогия коагуляции и изотермической перегонки менее очевидна. Рассмотрим коллоидный раствор с уже имеющимися в нём мелкими коллоидными частицами (например, мицеллами присадки в основе) радиуса r_1 . Пусть N таких частиц с объёмом $\nu_1 = 4\pi r_1^3/3$ слипаются в одну большую частицу радиуса R (коагулят). Пусть внутри коагулята каждая исходная частица взаимодействует с Z соседними и энергия взаимодействия каждой пары равна u . Тогда выигрыш в энергии составит $1/2 Zu$ на частицу внутри коагулята, и $1/4 Zu$ на частицу в поверхностном слое коагулята. Тогда в расчёте на один коагулят

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= -1/2 \cdot 4\pi/3 \cdot (R - r_1)^3/\nu_1 \cdot Zu - 1/4 \cdot 4\pi/3 \cdot (R^3 - (R - r_1)^3)/\nu_1 \cdot Zu = \\ &= -Zu/2\nu_1 \cdot 4\pi/3 \cdot R^3 + 4\pi R^2 Zu/4\nu_1 \cdot r_1(1 + r_1/R - r_1^2/3R^2). \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда видно, что изменение потенциала при коагуляции (5) подобно $\Delta\Phi$ при образовании зародышей воды в паре (1), если

$$|\Delta\mu_{eff}| = Zu/2; \sigma_{eff} = Zu/4\nu_1 \cdot r_1 \cdot (1 + r_1/R - r_1^2/3R^2). \quad (6)$$

Заметим, что всегда $R > r_1$, причём если $R \gg r_1$, то последними членами в скобке правой части (6) можно пренебречь, и аналогия переходит в идентичность. Если же R и r_1 одного порядка, то эти члены нужно рассматривать как поправку.

Тогда критический радиус устойчивости коагулята окажется равным

$$r_{coag}^* = 2\sigma_{eff}\nu_1/|\Delta\mu_{eff}| = r_1 \cdot (1 + r_1/R - r_1^2/3R^2) \approx 1.6r_1. \quad (7)$$

Такое значение r^* затрудняет коагуляцию, но не делает её невозможной. На самом деле для малых N выражения для $\Delta\mu_{eff}$ и σ_{eff} изменятся и величина r^* окажется меньше r_1 . Но рост крупных частиц от этого не зависит. Кинетика роста коагулята, состоящего из n частиц и имеющего радиус R_n , определяется потоком всех частиц, состоящих из 1, 2, ..., m единичных частиц радиуса r_1 , на поверхность такого n -частичного коагулята. Этот поток можно представить как [3]:

$$j_n = 4\pi\Sigma(R_n + r_m)D_{mn}c_m = 4\pi R_n^2[\Sigma D_{mn}c_m(1 + r_m/R_n)]/R_n. \quad (8)$$

Здесь r_m – радиус коагулята, состоящего из m единичных частиц, c_m – концентрация таких коагулятов, $D_{mn} = D_m + D_n$ – сумма коэффициентов диффузии m - и n -частичных коагулятов, суммирование ведётся по всем m . Видно, что если

$$(D\Delta c)_{eff} = \Sigma D_{mn}c_m(1 + r_m/R_n), \quad (9)$$

то поток частиц (8) аналогичен потоку молекул (3), и кинетика роста частицы за счёт коагуляции оказывается аналогична кинетике роста зародыша за счёт диффузионного потока молекул (4).

Таким образом, термодинамика и кинетика образования и роста КО в термодинамически неустойчивом (т. н. лиофобном) растворе присадки в масле оказываются аналогичны образованию и росту зародышей жидкости в переохлаждённом паре, причём эта аналогия не зависит от конкретного механизма роста КО. Забегая вперёд, заметим, что при различных внешних воздействиях на систему её реакция на воздействие может, тем не менее, зависеть от механизма роста ассоциатов (зародышей).

Итак, из результатов работы [4] был сделан вывод, что при прогреве раствора присадки в масле – основе в течение некоторого времени в нём образуются КО присадки, что и обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики масла.

С другой стороны, работа [5] и цитированный в ней патент [6] показали, что для приготовления масла традиционную температурную обработку можно заменить облучением смеси электромагнитным излучением сверхвысокой частоты.

Настоящая работа посвящена прямому экспериментальному доказательству появления и роста больших (> 20 нм) КО присадки в масле (т.е. аналогов зародышей новой фазы) не под действием нагрева, а под действием электромагнитного СВЧ-излучения без нагревания. Для этого были исследованы наличие КО в растворе и изменение их размеров под воздействием нагрева или СВЧ-излучения.

Измерения размеров КО присадок проводились методом корреляционной спектроскопии рассеянного света. В нашей экспериментальной установке образец композиции в цилиндрической кювете, помещённой в соосный с ней цилиндр с иммерсионной жидкостью и в термостатируемый корпус, помещался на столик гониометра Г-1,5 и освещался поляризованным лучом *He-Ne* лазера мощностью до 20 мВт. Кювета юстировалась так, чтобы её ось совпадала с осью вращения столика гониометра и его алидады. Рассеянный образцом поляризованный свет фокусировался на диафрагму, расположенную перед фотоумножителем. Фотоумножитель вместе с фокусирующей оптической системой был помещен на алидаду гониометра, что позволяло фиксировать угол рассеяния Θ с точностью до 1' (угловой минуты).

Сигнал с ФЭУ, работающего в одноэлектронном режиме, через усилитель-дискриминатор поступал на цифровой коррелятор "Фотокор" фирмы ООО "Антекс-97", Москва. В корреляторе накапливалась корреляционная функция интенсивности рассеянного света. Эта функция линейным соотношением Зигерта [8] связана с квадратом корреляционной функции электрического поля света, которая, в свою очередь, является в данном случае Фурье-образом центральной поляризованной рэлеевской линии спектра рассеянного света. Установка подробно описана в [7]. Другими словами, характерное время спадания корреляционной функции есть величина, обратная ширине спектральной линии, а форма корреляционной функции определяет форму спектра. Такой метод позволяет определить форму и ширину спектральных линий с характерной шириной от 0.1 до 10^5 Гц.

Для монодисперсных взвесей сферических частиц КО центральная поляризованная рэлеевская линия рассеянного света имеет форму Лоренциана с полушириной Γ на полувысоте, равной

$$\Gamma = Dq^2 = kTq^2/6\pi\eta r, \quad (10)$$

где D – коэффициент диффузии частиц, $q = |q_S - q_L| = (4\pi n \sin \Theta/2)/\lambda$; q_S и q_L – волновые вектора рассеянного и лазерного света; n – показатель преломления масла; λ – длина волны света; Θ – угол рассеяния; T – абсолютная температура; η – вязкость основы; r – радиус коллоидных образований, k – постоянная Больцмана. Поскольку нет оснований считать КО несферическими, мы будем пользоваться (1) для определения размера КО из корреляционных функций.

Для полидисперсных систем, содержащих КО с размерами r_1, r_2, \dots , спектр состоит из нескольких Лоренцевых кривых, наложенных друг на друга, с общим центром на нулевой частоте (по числу фракций частиц с различными размерами). В этом случае получаемая функция корреляции оказывается суммой такого же числа экспонент, характерное время спада каждой из которых равно $1/\Gamma_1, 1/\Gamma_2, \dots$, а их амплитуда пропорциональна интенсивности рассеяния света на каждой из фракций, то есть не просто пропорциональна концентрации частиц с данным размером, а зависит также и от этого размера и от показателя преломления вещества частиц.

Средний радиус коллоидных образований (СРКО) определялся с помощью (10) по ширине корреляционной функции методом моментов. Суть этого метода состоит в аппроксимации логарифма корреляционной функции поля рассеянного света

$$G^{(E)}(\tau) = \langle E(t)E^*(t + \tau) \rangle \quad (11)$$

полиномом. При этом коэффициент при τ даёт усреднённую величину Γ , и определяет СРКО, а следующие коэффициенты позволяют определить степень полидисперсности КО и асимметрию распределения по размерам.

Экспериментально определялись зависимости СРКО от времени нагревания образца или от времени СВЧ-облучения. Измерялась также интенсивность рассеянного света, а точнее, отношение полной интенсивности к интенсивности рассеяния в толуоле при 20°C . По интенсивности рассеянного света мы можем судить об изменении концентрации частиц, так как для мелких ($r < \lambda/20$) частиц [8]:

$$I_{\text{част}} = I_L \frac{16\pi^2 r^6}{\lambda^4 L} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) N V_{\text{pac}} \sim r^6 N (n^2 - 1). \quad (12)$$

Здесь I_L – интенсивность лазерного луча, L – расстояние до диафрагмы установки, V_{pac} – рассеивающий объём, попадающий в поле зрения ФЭУ, а N – концентрация частиц. Для частиц интересующих нас размеров ($\lambda/20 < r < \lambda$) интенсивность рассеянного света имеет довольно сложную угловую зависимость, однако в первом приближении её можно учесть так:

$$I_{\text{васм}}(\theta) = I(0)/(1 + q^2 r^2). \quad (13)$$

В наших измерениях для составления образцов в качестве основы использовалось базовое масло И20А SAE 10 производства ООО “Тектрон”, Московская область. Такое масло и аналогичное ему И30А используются как основа при производстве многих индустриальных масел.

В качестве присадки в изучаемых композициях использовалась присадка “Fenom” производства фирмы “Лаборатория триботехнологии”, Зеленоград.

Вязкость основы измерялась вискозиметром Хепплера и оказалась равной 52.7 сПз при 25 °С и 6.91 сПз при 80 °С. Коэффициент преломления И20А был 1.4833, а присадки – 1.4997.

Поскольку при наличии в образцах пыли рассеяние на ней оказывается значительно сильнее, чем рассеяние на КО присадки, образцы для измерений должны быть тщательно обеспылены. Основа И20А первоначально содержала большое количество пыли и ассоциатов с размерами от 150 до 600 нм, поэтому она предварительно фильтровалась через тефлоновые фильтры Fluogor фирмы “Millipor” с диаметром пор 0.2 мкм. Нужно заметить, что при этом фильтр с рабочим диаметром 30 мм забивался и переставал пропускать жидкость уже после фильтрации 100 мл основы.

Присадка “Fenom” пыли практически не содержит и могла бы использоваться без фильтрации, однако при смешивании композиция запылялась за счёт пыли, имеющейся на стенках кювет и в воздухе. Поэтому сразу после смешивания композиция профильтровывалась ещё раз в предварительно обеспыленную кювету. Забивания фильтров при этом не происходило.

Одна и та же композиция фильтровалась одновременно в кювету с металлическим фланцем – для измерений при нагреве в термостате, и в кювету с фланцем из капролона – для измерений при облучении в резонаторе СВЧ. При измерениях цилиндрические кюветы с помощью этих фланцев фиксировались в центре цилиндрического иммерсионного сосуда, что облегчало юстировку, снимало проблему бликов и улучшало точность измерений.

Обработка электромагнитным СВЧ-излучением проводилась в камере объёмом 20 л при мощности излучателя 600 Вт. При таком облучении температура образца увеличивалась не более чем на 1.5 °С.

В настоящей работе исследовались композиции с концентрацией “Fenom” 3.54 и 5.0% массовых.

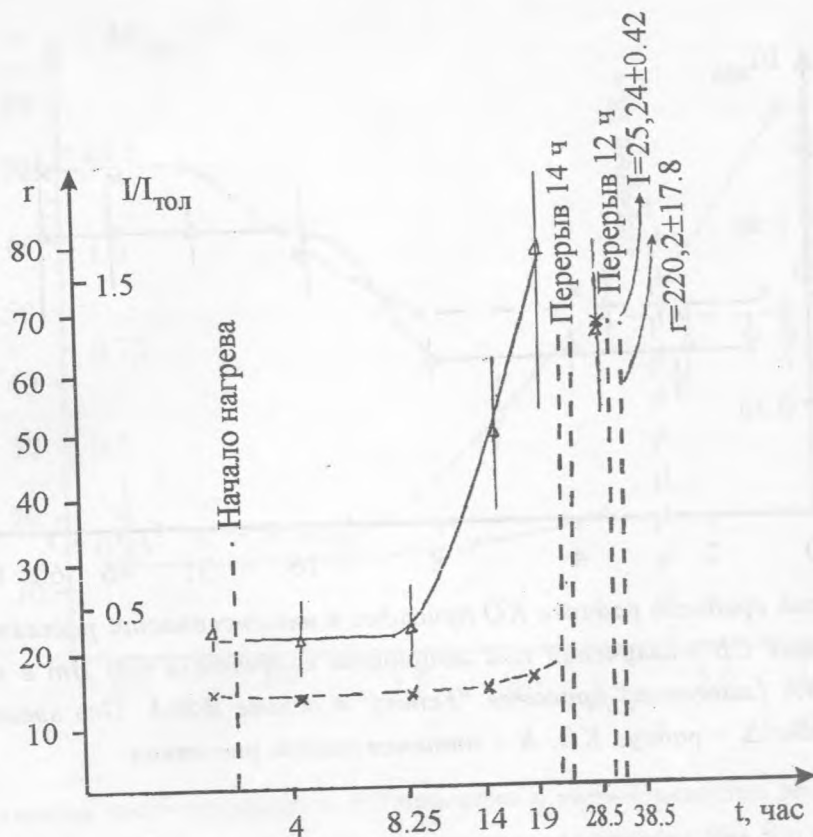


Рис. 1. Зависимость среднего радиуса КО присадки и интенсивности рассеянного света от времени прогрева раствора при 80°C . Раствор 3.54% (массовых) присадки "Гепог" в основе И20А. Ось времени в логарифмическом масштабе. Δ – радиус КО, \times – интенсивность рассеяния.

В ходе измерений фиксировались средний радиус КО r , интенсивность рассеянного света (точнее, отношение измеренной интенсивности к интенсивности рассеяния в толуоле I/I_{tol} при той же интенсивности лазерного луча). Величина r определялась из формулы (10) методом моментов. Измерения проводились под углами рассеяния 30, 36, 50 угловых градусов по 3 – 10 раз для каждого угла. Усреднённые по нескольким измерениям результаты приведены на рисунках 1 – 3. Приведённые результаты требуют некоторых пояснений.

Согласно нашим представлениям, сразу после смешивания присадки с основой в растворе вообще не должно быть никаких частиц, тем более если этот раствор только что отфильтрован. Однако мы, ещё до нагрева или облучения, наблюдаем во всех кюветках слабую, но совершенно отчётливую функцию корреляции при $I/I_{tol} \sim 0.24 - 0.27$ с ма-

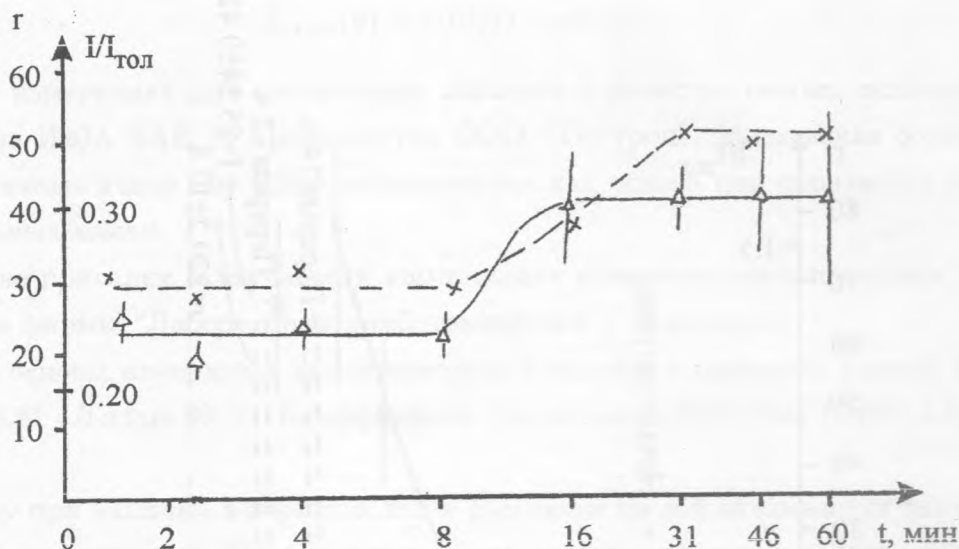


Рис. 2. Зависимость среднего радиуса КО присадки и интенсивности рассеянного света от времени воздействия СВЧ-излучения при мощности излучателя 600 Вт в камере объемом 20 л. Раствор 3.54% (массовых) присадки "Фепот" в основе И20А. Ось времени в логарифмическом масштабе. Δ – радиус КО, \times – интенсивность рассеяния.

лой амплитудой ($\sim 0.03 - 0.09$ для разных углов) и соответствующую $r \sim 22 - 28$ нм. По-видимому, наличие такой функции связано с остаточными пылью и ассоциатами, проникающими через фильтр при обеспыливании раствора. Далее это рассеяние мы будем называть паразитным.

Это означает, что при обсуждении всех приведённых здесь результатов нужно рассматривать не их абсолютные величины, а их отличия от начальных значений. По-видимому, в начальной стадии нагрева или облучения образующиеся КО ещё слишком малы и (или) их мало. Рассеянный на них свет оказывается недостаточно интенсивным, и его корреляционная функция незаметна на фоне корреляционной функции остаточного паразитного рассеяния. Поэтому сначала мы наблюдаем функцию корреляции не рассеяния на КО, а паразитного рассеяния на остаточных пыли и ассоциатах, и средний радиус, определяемый по корреляционной функции, оказывается постоянным. Когда же размер и количество КО возрастают под действием нагрева или СВЧ-облучения, рассеяние на КО превышает интенсивность паразитного рассеяния, и мы наблюдаем рост среднего радиуса и интенсивности рассеяния. Пользуясь такой методикой, из рисунков можно сделать следующие выводы.

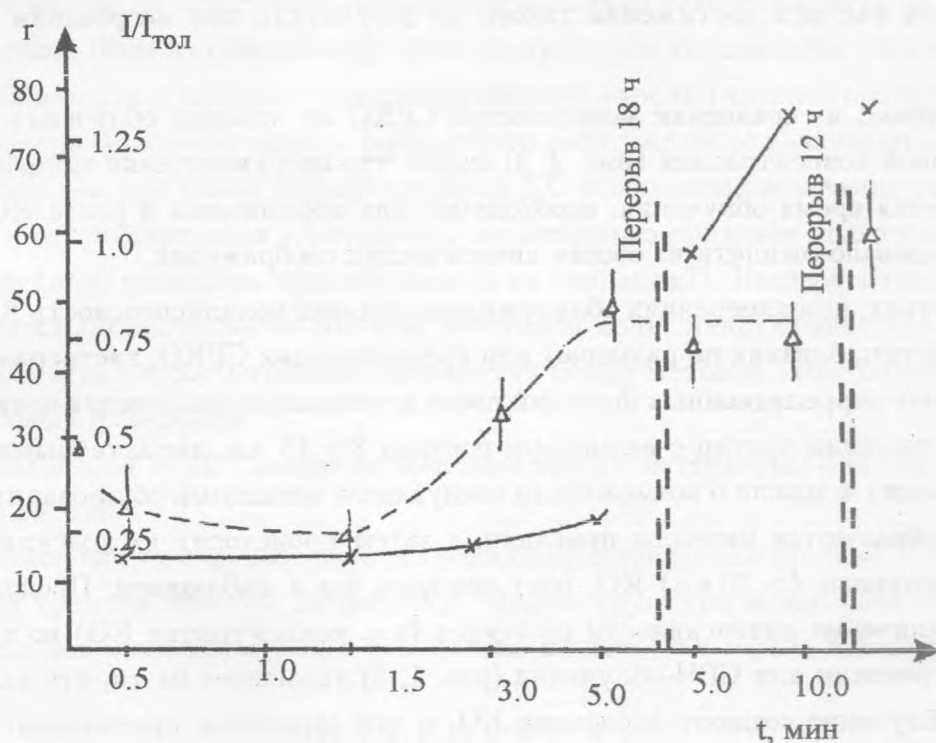


Рис. 3. Зависимость среднего радиуса КО присадки и интенсивности рассеянного света от времени воздействия СВЧ-излучения при мощности излучателя 600 Вт в камере объемом 20 л. Раствор 5% (массовый) присадки "Геот" в основе И20А. Ось времени в логарифмическом масштабе. Δ – радиус КО, X – интенсивность рассеяния.

Во-первых, рост ассоциатов и, по-видимому, (сначала) их образование происходит как при выдержке раствора при повышенной температуре (рис. 1), так и при воздействии на раствор электромагнитного СВЧ-излучения (рис. 2, 3). Образование и рост ассоциатов при воздействии СВЧ-излучения, насколько нам известно, наблюдается впервые, хотя на основе совместного рассмотрения статей [5] и [4] можно было предполагать наличие такого явления.

Сравнение приведённых на рис. 1 и 2 результатов показывает, что рост размеров КО (СРКО) до превышения размеров паразитных частиц происходит как под воздействием температурного нагрева до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 9 часов, так и под воздействием поля СВЧ-излучения длительностью 8 минут мощностью 600 Вт в камере объёмом 20 л (амплитуда напряжённости поля $\sim 5\text{ В/см}$). Величина СРКО 40 нм, соответствующая стабилизации размера КО при СВЧ-облучении, достигается за 15 минут облучения,

в то время как для достижения такого же результата при нагревании требуется 13 часов.

Во-вторых, из сравнения зависимостей СРКО от времени облучения для композиций с разной концентрацией (рис. 2, 3) видно, что при увеличении концентрации резко уменьшается время облучения, необходимое для образования и роста КО. Такого эффекта следовало ожидать из общих кинетических соображений.

В-третьих, при измерениях обнаружилась сильная полидисперсность КО в растворе. Кроме частиц, близких по размерам или превышающих СРКО, гистограммный анализ измеренных корреляционных функций после длительного накопления показывает наличие в композиции частиц с размерами порядка 3 – 15 нм, характерными для мицелл. Это приводит к мысли о возможности следующего механизма образования и роста КО: сначала образуются мицеллы присадки, а затем происходит их коагуляция, т.е. слипание в крупные (> 20 нм) КО, рост которых мы и наблюдаем. Продолжение роста КО и увеличение интенсивности рассеяния (т.е. концентрации КО) во время перерывов в нагревании или СВЧ-облучении (рис. 1, 3) указывает на то, что как нагрев, так и СВЧ-облучение создают зародыши КО, и эти зародыши продолжают расти уже и после прекращения воздействия на раствор. Вопрос о росте не только размеров, но и концентрации КО выходит за рамки настоящей работы и будет рассмотрен отдельно.

Как показано выше, различные механизмы роста КО в термодинамически неустойчивой системе аналогичны и, следовательно, по форме кривых $r(t)$ установить механизм роста частиц нельзя. Но реакция раствора на внешнее воздействие (например, СВЧ-облучение) может быть различной, и для управления размерами КО и их стабилизации нужно знать механизм роста. Для коллоидных образований, состоящих из жидких капель, возможен механизм изотермической перегонки в чистом виде, т.е. рост КО за счёт диффузии вещества присадки с поверхности мелких КО и из раствора на поверхность крупных КО. Для взвесей твёрдых частиц возможна только коагуляция. В коллоидной химии часто принимается, что рост КО происходит за счёт слипания, т.е. коагуляции, однако нам неизвестны экспериментальные подтверждения реализации именно этого механизма роста.

Таким образом, в настоящий момент у нас нет точного знания механизма роста КО ни при нагреве, ни при воздействии электромагнитного поля. Если рост КО происходит за счёт диффузии вещества присадки с поверхности мелких КО и из раствора на поверхность крупных КО, то неясно, как электромагнитное поле столь резко увеличивает коэффициент диффузии. Если же рост КО происходит за счёт слипания мицелл и

мелких КО, то можно предположить следующий механизм ускорения роста КО под действием излучения. Поле излучения нарушает поляризацию сольватного слоя КО, и при одинаковом сближении и частоте соударений слияние капель (частиц) происходит легче, так как поляризационные заряды сольватного слоя уже не отталкиваются. Однако остаётся неясно, как при таком механизме роста КО небольшое увеличение температуры ($\sim 50^\circ\text{C}$) в отсутствие поля увеличивает на несколько порядков подвижность этих мелких частиц (или, возможно, эффективность их слипания?). Неизвестно пока также, чем определяется скорость роста КО под действием поля: напряжённостью поля или его градиентом. Эти вопросы требуют разработки новых методик эксперимента, новых программ и новых измерений.

Авторы благодарят Г. В. Ракаеву за помощь в поиске литературы и за ряд полезных замечаний по работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Москвы, как победителя конкурса грантов Москвы по разделу "Инфраструктура и адресная поддержка науки" Программы развития науки и технологий в интересах города Москвы 2005 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л., Наука, 1975.
- [2] Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. (сер. Теоретическая физика), 10, М., Наука, 1979.
- [3] Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М., Изд-во МГУ, 1982.
- [4] Капустин А. М., Кривохижа С. В., Ракаева Г. В., Чайков Л. Л. Химия и технология топлива и масел, N 1, 26 (1995).
- [5] Рухадзе А. А., Юсупалиев У., Егоров Ю. М., Лугин В. Г., Шутеев С. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 23 (2001).
- [6] Егоров Ю. М. и др. Патент на изобретение РФ N RU 2158175 C1 от 07.02.2000.
- [7] Чайков Л. Л. Труды ФИАН СССР, 207, 84 (1991).
- [8] Джейкман Е. Корреляция фотонов. В книге: Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов. Под ред. Камминса Г. и Пайка Э. М., Мир, 1978, стр. 71-145.
- [9] Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.-Л., Гостехтеоретиздат, 1952.

Поступила в редакцию 25 января 2006 г.