

УДК 536.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНЫХ
ЖИДКИХ РАСТВОРОВ С ДВОЙНОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКОЙ***С. В. Кривохижа, И. Л. Фабелинский, Л. Л. Чайков*

Изучены температурные зависимости радиуса корреляции и вязкости в критическом растворе гваякол — глицерин. Определено изменение критического индекса ν по мере сужения области расслаивания раствора. Предложена удобная форма критерия Гинзбурга.

Экспериментальные и теоретические исследования фазовых превращений различной природы представляют собой в настоящее время обширную область актуальных физических задач.

По-видимому, первые экспериментальные наблюдения фазового превращения второго рода сделал К. де ля Тур (1822 г.) [1], увидевший, что в запаянной стеклянной трубке, заполненной жидкостью наполовину, при определенной температуре граница раздела между жидкостью и ее парами исчезает. На важное значение результатов этих опытов только спустя несколько десятилетий указал Фарадей (1848 г.) [2]* и Менделеев (1860 г.) [3]*. Позже Гезри (1884 г.) обнаружил, что две несмешивающиеся прозрачные жидкости, между которыми имеется четкая граница раздела, при определенной температуре смешиваются между собой и образуют однородный раствор. Было отмечено, что в момент исчезновения границы раздела среда становится мутной.

Такое сильное увеличение интенсивности рассеянного света получило название «критической опалесценции». Это явление было объяснено Смолуховским (1908 г.) [4], связавшим его с сильным возрастанием флуктуаций концентрации в растворе или с флуктуациями плотности в случае системы жидкость — пар.

Теория светорассеяния в критической области для жидких систем была разработана Орнштейном и Цернике [5, 6]. В общем случае фазовых переходов второго рода такая теория была разработана Гинзбургом [7] и его учениками [8] на основе теории фазовых переходов Гинзбурга — Ландау [9].

В этой теории используется важная величина, которая носит название параметра порядка и по которой происходит разложение свободной энергии системы. Физический смысл этой величины для различных фазовых переходов различен. Так, параметр порядка в сегнетоэлектриках — это спонтанная электрическая поляризация, а вблизи критической точки расслаивания растворов — отличие концентрации от критической и т. д.

Флуктуации таких величин, ведущие к флуктуациям показателя преломления, создают оптические неоднородности, вызывающие светорассеяние. Интенсивность, угловая зависимость рассеянного света и его спектр целиком определяются среднеквадратичной величиной флуктуаций, их размерами и кинетикой. Поэтому рассеяние света представляет собой одно из самых мощных средств изучения фазовых переходов и критических явлений.

Расслаивающиеся растворы проявляют все общие свойства систем, в которых происходят фазовые переходы и критические явления, и

* К сожалению, авторам не удалось ознакомиться с этими работами.

представляют широкие возможности для исследования этих свойств, поскольку работать с растворами относительно просто.

В настоящее время изучен ряд бинарных расслаивающихся растворов с верхней (ВКТР) или нижней (НКТР) критической точкой расслаивания и несколько растворов с областью расслаивания [10-12]. Поведение этих растворов описывается фазовыми диаграммами на плоскости C, T , где C — концентрация одного из компонентов, T — температура.

В некоторых растворах область расслаивания под действием давления или при добавлении малых концентраций третьего компонента меняет свои размеры и может стягиваться в точку [12]. В последнем случае расслаивания не происходит, но в области такой точки можно наблюдать аномально большие флуктуации концентрации [13]. Фазовая диаграмма таких растворов будет представлять собой купол в координатах C, T, P или C, T, C_x , где P — давление, C_x — концентрация третьего компонента (рис. 1). Внутри купола существует гетерогенная среда, а вне его — гомогенный раствор.

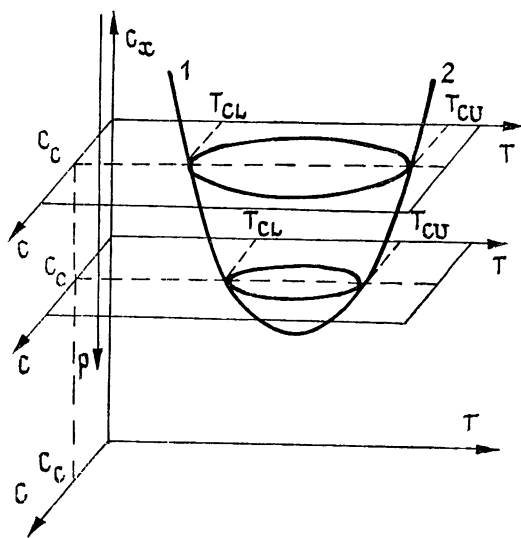


Рис. 1. Куполообразная фазовая диаграмма раствора; C_c — критическая концентрация, T_{CU}, T_{CL} — температуры ВКТР и НКТР соответственно
1 — линия НКТР, 2 — линия ВКТР.

На поверхности купола существуют линии верхних и нижних критических точек. Эти линии сходятся в экстремуме купола, образуя двойную критическую точку расслаивания (ДКТ).

Настоящая работа посвящена исследованию раствора гваякол — глицерин с куполообразной поверхностью сосуществования. Были исследованы фазовая диаграмма такого раствора, особенности поведения вязкости и радиуса корреляции.

Фазовые диаграммы раствора при постоянной концентрации воды в глицерине C_w представляют собой сечения куполообразной поверхности расслаивания плоскостями, параллельными плоскости C, T (рис. 2) [14].

Из рисунка видно, что по мере уменьшения концентрации воды фазовые диаграммы стягиваются в точку к вершине купола. Одновременно по концентрации зависимости интенсивности рассеяния света была определена критическая концентрация раствора. Она оказалась равной 47,05 объемных процента глицерина в сухом растворе.

Температурная зависимость вязкости в критическом растворе гваякол — глицерин [15] определялась при различных ширинх области расслаивания $\Delta T = T_{CU} - T_{CL}$, где T_{CU} и T_{CL} — температуры верхней и

нижней критических точек расслаивания. Часть результатов измерений вязкости приведена на рис. 3.

Из рисунка следует, что вязкость 1) при приближении к критической температуре T_c возрастает, 2) скорость возрастания вязкости по мере приближения к T_c уменьшается по мере сужения области расслаивания, т.е. с уменьшением концентрации воды, 3) в растворах, близких к расслаиванию, но не расслаивающихся, наблюдается максимум вязкости, 4) в растворах, далеких от расслаивания (в сухих), наблюдается монотонная температурная зависимость вязкости, 5) величина вязкости не подчиняется закону аддитивного сложения вязкостей компонент раствора.

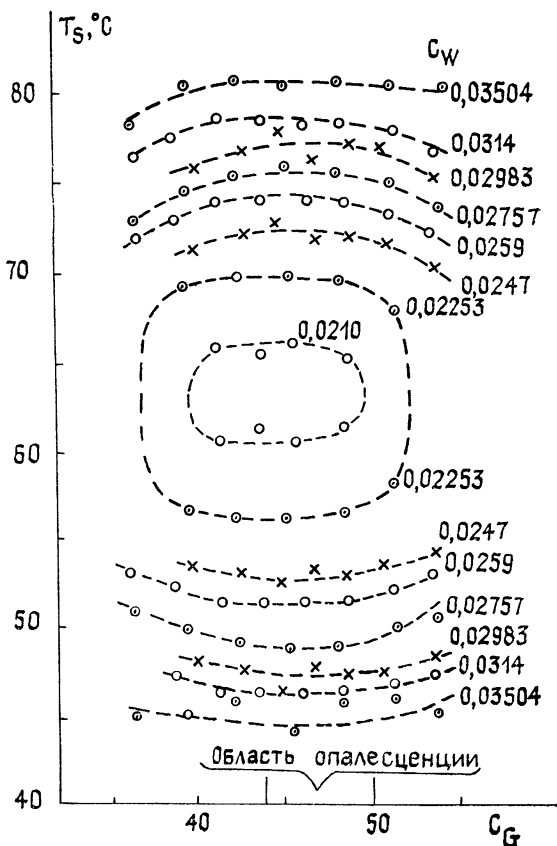


Рис. 2 Фазовые диаграммы раствора гваякол—глицерин с добавлением воды при постоянной объемной концентрации воды в глицерине C_W ;

T_s — температура расслаивания раствора

В ряде ранее выполненных работ по исследованию расслаивающихся растворов с верхней или нижней критической точкой при приближении к критической точке наблюдалось увеличение вязкости примерно на 15—20% [16, 17]. Обычно при интерпретации результатов измерений вязкость η разделялась на фоновую часть η^b и критическую η^c ($\eta = \eta^b + \eta^c$). Поскольку в критической области η^c невелико, важно точно знать фоновую часть. Фоновую часть η^b получали путем экстраполяции температурной зависимости вязкости, измеренной вдали от критической температуры, в область критических температур. При этом, так как исследования проводились с растворами, имеющими только одну критическую точку, и выполнялись в ограниченном температурном диапазоне, оказывалось чрезвычайно трудно определить границу критической области. Это приводило к неоднозначности в определении величины фоновой вязкости.

В наших экспериментах с растворами гваякол — глицерин оказалось возможным определять фоновую часть вязкости с меньшей погрешностью. Знание характера изменения вязкости в «сухих» растворах, не имеющих особенностей, позволяет графически определить фоновую часть вязкости для растворов с областью расслаивания по значениям вязкости, измеренным вдали от области расслаивания.

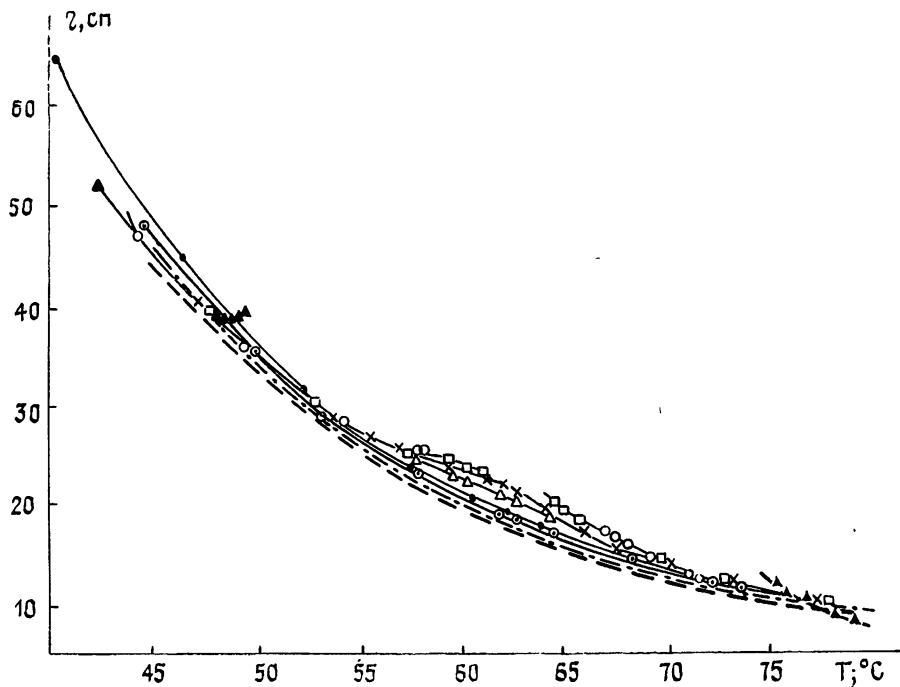


Рис. 3. Температурная зависимость вязкости в растворе гваякол — глицерин с различными ширинами области расслаивания ΔT и концентрациями воды C_w , \blacktriangle — $\Delta T = 25,81^\circ \text{C}$, $C_w = 2,73$ об%; \circ — $\Delta T = 8,73^\circ \text{C}$, $C_w = 2,15$ об%, \square — $\Delta T = 3,24^\circ \text{C}$, $C_w = 2,085$ об%; \triangle , \times — $\Delta T = 0^\circ \text{C}$, $C_w = 2,07$ и $2,08$ об%; \odot — «сухой», $C_w = 1,33$ об%; \bullet — «сухой», $C_w = 0,45$ об%; — — — η^b для $\Delta T = 0^\circ \text{C}$, - - - η^b для $\Delta T = 25,81^\circ \text{C}$.

Определенные графически величины η^b и η^c в растворах с областью расслаивания и в растворах в вершине купола мы попытались описать формулой теории взаимодействующих мод [18]:

$$\begin{aligned} \eta^c/\eta &= X_\eta \ln(q_D r_c) = -X_\eta \nu \ln \varepsilon + X_\eta \ln(q_D r_c) = \\ &= -V \ln \varepsilon + \ln R_\eta. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь X_η — критический показатель вязкости, q_D — постоянная с размерностью см^{-1} , зависящая от свойств раствора, r_c — радиус корреляции флуктуаций концентрации, причем

$$r_c = r_0 \varepsilon^{-\nu}, \quad (2)$$

где r_0 — постоянная, $\varepsilon = |T - T_c|/T_c$, ν — критический индекс радиуса корреляции, V — эффективный индекс вязкости, R_η — постоянная величина. При аппроксимации учитывалась поправка на взаимодействие градиента скорости, возникающего при изменении вязкости, с флуктуациями, обладающими конечным r_c [19, 20]. По результатам наших измерений $X_\eta = 0,063$. Значения величины V , полученные в результате аппроксимации, приведены на рис. 5 вверху.

Радиус корреляции r_c определялся по экспериментально измеренной ширине Γ центральной поляризованной релеевской линии рассеяния света и сдвиговой вязкости η . Измерения Γ проводились методом

самобиений рассеянного света с помощью коррелятора «Malvern» К 7023 на установке, схематически описанной в [11].

При определении радиуса корреляции из наших измерений мы пользовались выражением для Γ , следующим из теории взаимосвязанных мод [18, 21]:

$$\Gamma = \Gamma_b + \Gamma_c = D_b q^2 (1 + x^2) + D_c q^2 R x^{-2} K_0(x). \quad (3)$$

Здесь Γ_b , D_b и Γ_c , D_c — регулярные и критические части ширины линии и коэффициента диффузии D , $R = 1,027$ — постоянная, $q = k_s - k_l$ — волновой вектор изучаемой фурье-компоненты флуктуаций, k_s и k_l — волновые векторы рассеянного и возбуждающего света,

$$D_c = kT/6\pi\eta r_c, \quad K_0(x) = (3/4) [1 + x^2 + (x^3 - x^{-1}) \arctg x],$$

k — постоянная Больцмана, η — сдвиговая вязкость, $x = qr_c$. Выражение (3) хорошо описывает экспериментальные данные для Γ при x , заключенных в интервале от 0,01 до 50 [22, 23].

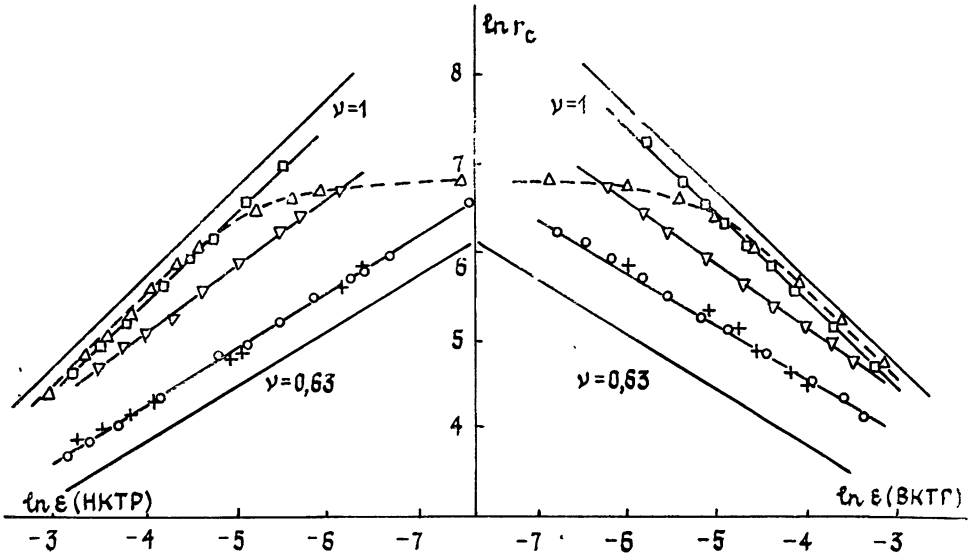


Рис. 4. Изменение радиуса корреляции при приближении к критической температуре для растворов с различными величинами области расслаивания
 \square — $\Delta T = 1,32^\circ \text{C}$; ∇ — $\Delta T = 7,84^\circ \text{C}$; $+$ — $\Delta T = 32,67^\circ \text{C}$; \circ — $\Delta T = 39,7^\circ \text{C}$,
 \triangle — раствор с особой точкой

Применимость метода определения r_c из Γ ограничена интервалом $x < 1$, поскольку при $x \gg 1$ Γ перестает зависеть от r_c . При $x < 1$ $K_0(x)$ можно разложить по степеням x и определить D_c и r_c из измеренных Γ и η :

$$D_c = \frac{\Gamma}{2Rq^2 (1 + \delta)} \times \quad (4)$$

$$\times \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4(1 + \delta) \frac{R^2}{\Gamma^2} q^6 \left(\frac{kT}{6\pi\eta} \right)^2 \left[\left(\frac{3}{5} + \delta \right) - \frac{q^2 r_c^2}{7} + \frac{q^4 r_c^4}{15} \right]} \right\};$$

$$r_c = \frac{kT}{6\pi\eta D_c}, \quad \delta = \frac{D_b}{R D_c}. \quad (5)$$

Величина D_b/D_c определяется выражением [18]

$$\frac{D_b}{D_c} = 0,675 \exp \left(- \frac{\eta^c}{\eta X \eta} \right). \quad (6)$$

Полученные температурные зависимости r_c для растворов с различными ширинами области расслаивания ΔT приведены на рис. 4 [24, 25]. Они аппроксимировались формулой (2). Результаты аппроксимации представлены ниже.

Таблица 1

ΔT	$\nu_{\text{ВКТР}}$	$\nu_{\text{НКТР}}$	$r_0 \text{ ВКТР}$	$r_0 \text{ НКТР}$
39,7	$0,60 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,02$	$8,7 \pm 0,7$	$5,3 \pm 0,5$
32,67	$0,67 \pm 0,03$	$0,61 \pm 0,03$	$6,4 \pm 0,7$	$6,1 \pm 0,05$
7,84	$0,75 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,02$	$8,8 \pm 0,6$	$8,0 \pm 0,7$
1,32	$1,00 \pm 0,03$	$1,01 \pm 0,02$	$4,1 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,4$

Как видно из приведенных результатов, в растворе наблюдается увеличение критического индекса ν с уменьшением величины области расслаивания раствора ΔT , т.е. с приближением к экстремуму купола. Причем вблизи экстремума купола при $\Delta T = 1,32^\circ \text{C}$ значение критического индекса возрастает до единицы.

Отметим, что вблизи экстремума купол расслаивания раствора гваякол — глицерин с малой добавкой воды практически плоский [9], и поэтому раствор с областью расслаивания $\Delta T = 1,32^\circ \text{C}$ находится в непосредственной близости к экстремуму купола расслаивания.

Из проведенных нами измерений следует, что при движении от области расслаивания при $\Delta T = 39,7^\circ \text{C}$ к экстремуму купола расслаивания $\Delta T = 1,32^\circ \text{C}$ для нижней и верхней критических точек критический индекс ν меняется от $\approx 0,63$ до единицы.

Нами были также выполнены измерения r_c в растворе без области расслаивания, но близком к расслаиванию, — в растворе с «особой точкой» [25]. Температурная зависимость r_c в таком растворе описывается не формулой (6), а выражением, полученным на основе теории Гинзбурга — Ландау [26],

$$r_c = r_0(\alpha_0 + t^2 + \alpha_4 t^4)^{-\nu}, \quad (7)$$

где $r_0 = 5,1 \text{ \AA}$, $\nu = 0,50$, $\alpha_0 = 4,13 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_4 = 371$ — величины, полученные в результате аппроксимации. Это выражение может быть использовано для описания $r_c(T)$ в растворе с ДКТ.

Согласно теории Гинзбурга — Ландау разложение свободной энергии по степеням параметра порядка ψ имеет вид [9]

$$\Phi = \Phi_0 + A\psi^2 + C_L\psi^3 + (B/2)\psi^4 + D(\nabla\psi)^2. \quad (8)$$

Здесь A , C_L , B , D — коэффициенты, причем A зависит от T . Через коэффициенты разложения могут быть определены восприимчивость χ , равновесное значение параметра порядка ψ_e и радиус корреляции r_c , в частности,

$$r_c = \sqrt{D/A}. \quad (9)$$

Причем вблизи ДКТ и особой точки зависимость коэффициента A от T имеет вид

$$A = a_0 + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + \dots, \quad (10)$$

где $t = |T - T_0|/T_0$, а T_0 — температура ДКТ, тогда

$$r_c = r_0(\alpha + t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \dots)^{-\nu}. \quad (11)$$

Здесь $\nu = 0,5$, $r_0 = \sqrt{D/a_2}$, $\alpha_i = a_i/a_2$, $i = 2, 3, 4$. Такая формула хорошо описывает поведение r_c в растворах с особой точкой гваякол — глицерин с добавкой воды и β -пиколин — вода [25, 26]. Сравнение температурных зависимостей r_c и интенсивности I рассеянного света в раст-

воре β -пиколин — вода показывает, что $I \sim r_c^2 T$, что также соответствует теории Гинзбурга — Ландау.

Для описания на основе теории Гинзбурга — Ландау изменения эффективного критического индекса ν в растворе с областью расслаивания удобно представить $r_c(T)$ в виде

$$r_c = r_0 [\varepsilon^2 \Sigma^2 + 2\varepsilon t_c \Sigma + \dots]^{-\nu}, \quad (12)$$

где $\Sigma = T_0/T_c$, $t_c = |T_c - T_0|/T_0$.

Из (12) видно, что при $t_c \ll \varepsilon_{\max}$, т.е. вблизи ДКТ, главным членом является $\varepsilon^2 \Sigma^2$, и эффективное значение индекса $\nu_{\text{эфф}} = 2\nu$, а при $t_c \gg \varepsilon_{\max}$ $\nu_{\text{эфф}} = \nu$. Формулы, аналогичные (11) или (12), можно получить и для случая применимости флуктуационной теории, и тогда, конечно, критический индекс $\nu = 0,63$.

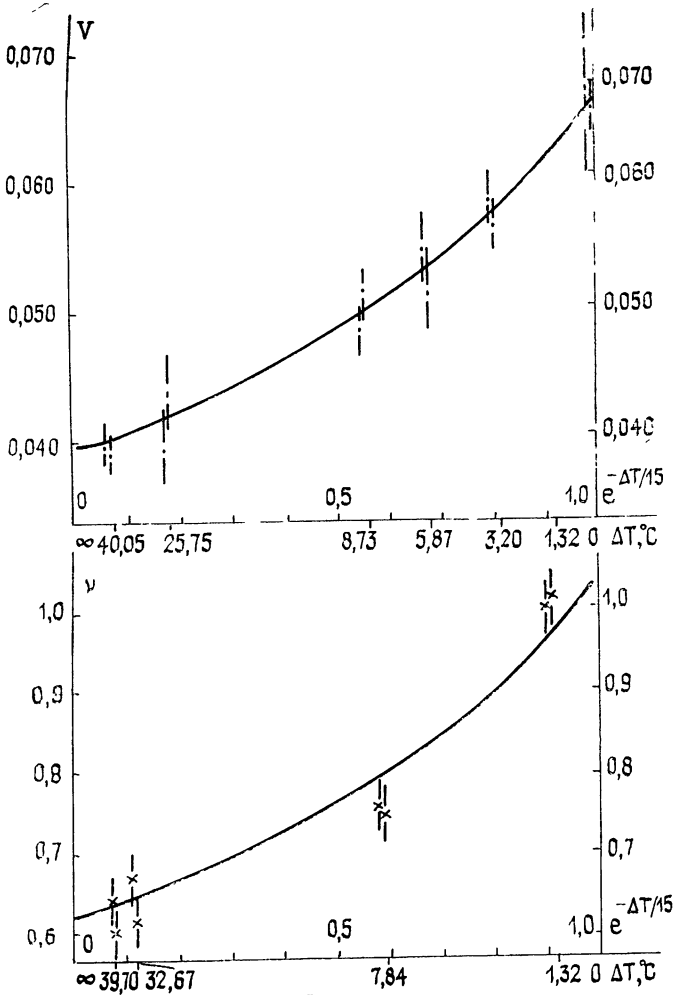


Рис. 5. Зависимость эффективных значений V и ν от ΔT ; верхняя кривая $V(e^{-\Delta T/15})$, полученная из измерений вязкости, проведена по средним областям перекрытия экспериментальных ошибок для $V_{\text{вктр}}$ и $V_{\text{нктр}}$, нижняя кривая сплошная линия получена из верхней кривой как $\nu = V/X_\eta$; экспериментальные точки получены из зависимостей $r_c(T)$ в растворах с различными ΔT .

Пределы применимости теории Гинзбурга — Ландау определяются критерием Гинзбурга [27]. Для наших целей критерий Гинзбурга удобно выразить через радиус корреляции

$$r_c^\Gamma = D^2/BkT_c. \quad (13)$$

Величину r_c^Γ для краткости будем называть радиусом Гинзбурга. Тогда при $r_c \ll r_c^\Gamma$ применима теория Ландау ($\nu=0,5$), а при $r_c \gg r_c^\Gamma$ флуктуационная теория ($\nu=0,63$). Выразив отношение D^2/B в формуле (13) через r_c , $\chi(T)$, $\psi_e(T)$, где $\chi = \chi_0 e^{-\nu}$, а $\psi_e = \psi_0 e^\beta$, можно получить выражение для радиуса Гинзбурга

$$r_c^\Gamma = r_0 \frac{\varphi r_0 \psi_0^2}{Q k T_c} \quad (14)$$

Здесь $\varphi = \pi^2 \lambda^{-4} n^2 (\partial n / \partial c)^2 k T / \rho = R_z^z / \chi$, λ — длина волны рассеянного света, n — показатель преломления, ρ — плотность, R_z^z — коэффициент поляризованного рассеяния света, направление поляризации которого перпендикулярно плоскости рассеяния, $Q = R_z^z / r_c^2$.

Оценка r_c^Γ для раствора гваякол — глицерин показывает, что у растворов с большими областями расслаивания $r_c^\Gamma = 8 \text{ \AA}$, т. е. все наши измерения лежат в области применимости флуктуационной теории. Вблизи ДКТ величина r_c^Γ растет, однако трудно точно сказать, до какой величины, так как вблизи пологого минимума купола мала точность в определении бинодали и, следовательно, в определении ψ_0 и β .

Теоретически линии ВКТР и НКТР обычно рассматриваются как единая линия критических точек. Тогда ДКТ ничем не отличается от остальных критических точек и должна описываться так же, как и ВКТР и НКТР, с помощью флуктуационной теории. Однако оценка радиуса Гинзбурга r_c^Γ для ДКТ показывает, что его величина лежит внутри диапазона r_c , соответствующего флуктуационной теории, кроме того, поведение радиуса корреляции в растворе с особой точкой, близком к ДКТ, хорошо описывается выражением (11), основанным на теории Гинзбурга — Ландау.

На основе полученных нами экспериментальных результатов мы попытались определить предельное значение индекса $\nu_{\text{эфф}}$ при приближении к ДКТ. Для этого было проведено сравнение температурных зависимостей вязкости и радиуса корреляции.

На рис. 5 сверху приведена зависимость усредненных по ВКТР и НКТР значений эффективного индекса вязкости V от ширины области расслаивания. (Для удобства по оси абсцисс отложена $\exp(-\Delta T/15)$.) По усредненным значениям V проведена верхняя кривая. На рис. 5 внизу эта же кривая приведена в масштабе $V/X_\eta = \nu_{\text{эфф}}$. При этом, как следует из наших измерений, $X_\eta = 0,063$. Здесь же показаны значения $\nu_{\text{эфф}}$, полученные из температурных зависимостей r_c для растворов с различной шириной области расслаивания. Видно, что в пределах экспериментальных ошибок значения $\nu_{\text{эфф}}$, полученные из температурных зависимостей η и r_c , совпадают. С учетом ошибок эксперимента предельное значение $\nu_{\text{эфф}}$, полученное из рис. 5 при $\Delta T \rightarrow 0$, т. е. при приближении к ДКТ, оказывается равным $\nu_{\text{эфф}} = 1,03 \pm 0,06$.

Отметим, что добавление малого количества спиртов в раствор гваякол — глицерин с областью расслаивания приводит к исчезновению последней и раствор становится гомогенным, а добавление бензола, ацетона, четыреххлористого углерода расширяет область расслаивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. C a r g h i a r d de la Tour. — Ann. Chem. Phys., 1822, 21(2), p. 178.
2. F a r a d a y M — Phil. Trans., 1845, p. 155.
3. Менделеев Д. И. — Хим. журн. Соколова и Энгельгарта, 1860, 3, с. 81
4. S m o l u c h o w s k y M. — Ann. Phys., 1908, 25, p. 205
5. O r n s t e i n L. S., Z e r n i k e F — Amsterdam Proc., 1914, 17, p. 793
6. O r n s t e i n L. S., Z e r n i k e F — Amsterdam Proc., 1916, 18, p. 1520
7. Гинзбург В. Л. — ДАН СССР, 1955, 105, с. 240
8. Гинзбург В. Л., Леванюк А. П., Собынин А. А. — УФН, 1980, 130, с. 615
9. Ландау Л. Д., Лифшиц И. М. Статистическая физика. Ч. 1 — М.: Наука, 1976.

10. Анисимов М. А. — УФИ, 1974, 114, с. 249.
11. Кривохижа С. В., Луговая О. А., Чайков Л. Л. — Опт. и спектр., 1984, 56, с. 381
12. Speider G. M. — Ber. Buns. Gesel. Phys. Chem., 1972, 76, p. 325.
13. Эскин В. Е. Рассеяние света растворами полимеров — М. Наука, 1973.
14. Кривохижа С. В., Луговая О. А., Фабелинский И. Л., Чайков Л. Л. — ЖЭТФ, 1985, 89, с. 85.
15. Кривохижа С. В., Чайков Л. Л. — Сб. Краткие сообщения по физике, 1985, № 9, с. 50
16. Lee S. B. — Chem. Phys. Lett., 1978, 57, p. 611.
17. Семченко В. К., Зорина Е. А. — ДАН СССР, 1952, 84, № 6, с. 1191.
18. Oxtoby D. V., Gelbart W. W. — J. Chem. Phys., 1974, 61, p. 2956.
19. Oxtoby D. V. — J. Chem. Phys., 1975, 62, № 4, p. 1463.
20. Pegg I. L., McLure I. A. M. — Molec. Phys., 1984, 53, p. 897
21. Kawasaki K. — Ann. Phys. (NY), 1970, 61, p. 1.
22. Burstyn H. C., Sengers J. V. — Phys. Rev., 1982, A 25, p. 448.
23. Chen S. H., Lai C. C. et al. — Phys. Rev., 1983, A 27, p. 1086
24. Зайцев В. П., Кривохижа С. В., Фабелинский И. Л., Цитровский А., Чайков Л. Л., Швецов В. Яни П. — Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, с. 85.
25. Фабелинский И. Л., Кривохижа С. В., Чайков Л. Л. — УФН, 1986, 149, с. 328.
26. Chaikov L. L., Malomuzh N. P. — Phys. Lett., 1983, 93 A, p. 414
27. Гинзбург В. Л. — ФТТ, 1960, 2, с. 2034.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BINARY LIQUID SOLUTIONS HAVING A DOUBLE CRITICAL POINT

S. V. Krivokhizha, I. L. Fabelinskij, L. L. Chaikov

Temperature dependences of the correlation radius and viscosity are investigated in guaiacol-glycerin critical solutions. Variation of the critical index ν following the closed-loop diagram narrowing is determined. A convenient form of the Ginzburg criterion is proposed.

VII ВСЕСОЮЗНАЯ ШКОЛА ПО ФИЗИКЕ ИОНОСФЕРЫ

(Окончание)

В. И. Таран в своей лекции осветил возможность исследования верхней атмосферы радиофизическим дистанционным методом — определение свойств среды на основе взаимодействия с радиоволнами различных длин волн. К числу наиболее часто используемых локационных методов изучения ионосферы относятся методы зондирования, «частичных отражений», когерентного и некогерентного рассеяния. Приведены сравнительные характеристики радаров различных типов, параметры ионосферы и атмосферы, которые можно получить на основе радарных измерений.

Лекция Г. Л. Гдалевича «Ракетные и спутниковые измерения ионосферных параметров» посвящена особенностям прямых экспериментов в ионосферной плазме. Определен оптимальный состав приборов для комплексного изучения процессов в ионосфере, описаны основные используемые методы измерения и их достоинства и недостатки. Особое внимание уделено зондовым экспериментам и их перспективе для исследования ионосферы.

Н. А. Савич в своей лекции привел существующие данные об ионосферах планет солнечной системы и их спутниках, подробно изложил методику радиозатмного метода исследования ионизованных оболочек небесных тел, представил накопленный с его помощью обширный материал по ионосферам Венеры и Марса, дал теоретическую интерпретацию экспериментальных данных и изложил предварительные данные о распределении плазмы в оболочке кометы Галлея, полученные с помощью двухчастотного радиозондирования при пролете вблизи кометы космических станций «Вега-1, 2» в марте 1986 г.

Школа прошла успешно. На современном высоком научном уровне были представлены все лекции и проведено 13 дискуссионных заседаний, где с участием ведущих специалистов обсуждались наиболее актуальные вопросы физики ионосферы.

Л. А. Юдович