

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. Т. С. Тесленко. ФГВ, 1977, 13, 1.
3. М. Л. Уилкинс. Расчет упруго-пластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.
4. В. П. Челышев, В. И. Шехтер, Л. А. Шушко. ФГВ, 1970, 6, 2.
5. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко.— В сб.: Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
6. М. Райс, Р. Мак-Куин, Дж. Уолш.— В сб.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
7. Р. Мак-Куин, С. Марш.— В сб.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
8. Т. С. Тесленко. ФГВ, 1976, 12, 1.
9. Р. Н. Нигматулин, Н. Х. Ахмадеев. Отчет № 1819, Института механики МГУ. М., 1977.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРЕВРАЩЕНИЕ НИТРОБЕНЗОЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ ДО 30 ГПа

*В. В. Якушев, А. Н. Дремин, С. С. Набатов,
В. М. Шунин*

(Черноголовка)

Настоящая работа посвящена изучению динамической сжимаемости, электропроводности, диэлектрических свойств, поглощения света и ударной поляризации нитробензола в интервале динамических давлений 3—30 ГПа. Комплексное исследование предпринято для того, чтобы глубже понять процессы, происходящие в нитробензоле как представителе ароматических нитросоединений при высоких давлениях и температурах ударного сжатия.

В опытах использовали нитробензол марки ч. д. а., перегнанный под вакуумом. Измерительная аппаратура описана в [1]. Для получения требуемых динамических давлений применялись специальные взрывные устройства диаметром 80 и высотой 120 мм, создающие в образцах близкие к одномерным ударные волны слабоспадающего профиля. В ряде экспериментов по измерению электропроводности и для создания давлений выше 16 ГПа использовались алюминиевые ударники различной толщины, разогнанные продуктами детонации. В этом случае ударные волны в образцах имели прямоугольный профиль давления.

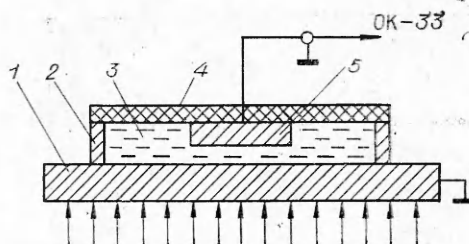
Динамическая сжимаемость и уравнение состояния

Ударная адиабата нитробензола определялась методом отражения [2]. В качестве эталонов выбраны медь ($U=3,95+1,50u$ км/с [3]) и алюминий ($U=5,25+1,39u$ км/с [4]). Здесь U — скорость фронта ударной волны (ФУВ), u — массовая скорость.

Схема опытов в области давления до 13 ГПа, где нитробензол остается хорошим диэлектриком, показана на рис. 1. Временными отметками пересечения ФУВ границ раздела экран — образец — электрод в данном случае служили электрические сигналы ударной поляриза-

Рис. 1. Схема экспериментов.

1 — металлический экран диаметром 80 и толщиной 8 мм; 2 — металлическое кольцо диаметром 50 мм; 3 — исследуемое вещество; 4 — крышка из изолятора. Расстояние между экраном и электродом $2 \pm \pm 0,01$ мм; 5 — электрод диаметром 10 мм.



цин [5]. Соответствующая осциллограмма представлена на рис. 2. Видно, что она позволяет четко фиксировать время прохода ФУВ между экраном и электродом.

Применяемый метод определения скорости имеет ряд преимуществ перед традиционными электроконтактными. В частности, полностью отсутствуют искажения формы ФУВ на зондах, имеется возможность контроля одновременности входа ударной волны в образец по ширине начального импульса поляризационного тока [6], не требуется специальных электрических схем, вырабатывающих в момент замыкания датчика крутой электрический импульс.

В области выше 13 ГПа из-за высокой электропроводности сжатого вещества характер поляризационных сигналов изменялся [7] и обсчет осциллограмм был затруднен. Поэтому в диапазоне 13—33 ГПа скорость ФУВ определялась обычным контактным методом аналогично [1]. При этом электрические сигналы дополнительно дифференцировались, что позволяло повысить точность отсчетов.

По измеренным значениям U в нитробензоле и известному состоянию материала экрана рассчитывалась массовая скорость, давление p и величина сжатия σ . Соответствующие данные приведены в табл. 1, где величины U усреднены по трем-четырем опытам каждая. Экспериментальная ударная адиабата нитробензола в $U-u$ -координатах представляет собой две прямые линии ($U=2,04+1,50u$ км/с при $3,3 \leq U \leq 5,15$ и $U=2,00+1,40u$ км/с при $5,32 \leq U \leq 6,95$).

Ход адиабаты в координатах давление — мольный объем (V_m) показан на рис. 3. Излом кривой при 13 ГПа свидетельствует о том, что начиная с этого давления за время измерения, т. е. меньше, чем за 0,4 мкс, нитробензол претерпевает превращение с уменьшением объема. Соответствующий декремент объема при 13 ГПа составляет $2,6 \text{ см}^3/\text{моль}$. Следует подчеркнуть, что определенное таким образом давление начала превращения естественно должно зависеть от скорости спада давления за ФУВ и от времени измерения.

При динамических давлениях выше ~ 10 ГПа температура T за ФУВ в прозрачных средах может быть определена по тепловому излу-

Таблица 1

Экран			Нитробензол		
материал	u , км/с	U , км/с	u , км/с	p , ГПа	σ
Медь	0,48	3,30	0,86	3,41	1,35
	0,95	4,15	1,45	7,24	1,54
	1,13	4,56	1,69	9,27	1,59
	1,20	4,71	1,80	10,2	1,62
Алюминий	1,43	5,15	2,09	12,9	1,68
	1,65	5,32	2,40	15,3	1,82
	1,92	5,97	2,75	19,7	1,85
	2,16	6,27	3,10	23,4	1,98
	2,52	6,95	3,90	32,6	2,28

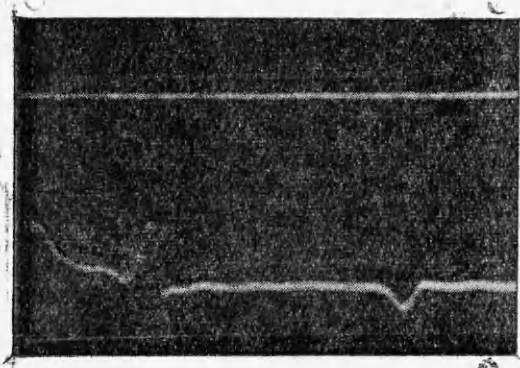


Рис. 2. Осциллограмма электрического сигнала; частота калибровочной синусоиды 10 МГц.

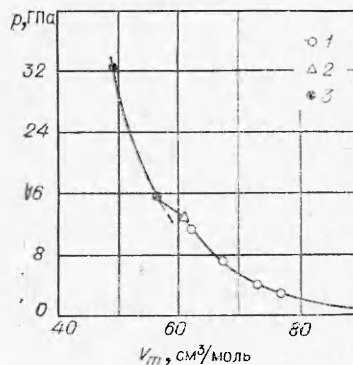


Рис. 3. Ударная адиабата нитробензола и результаты оптических экспериментов.

Состояние вещества за ФУВ: 1 — прозрачное, 2 — полупрозрачное, 3 — непрозрачное.

чению сжатого вещества. Однако при более низких давлениях экспериментальные методы измерения температуры в настоящее время отсутствуют и ее приходится рассчитывать с использованием приближенных уравнений состояния. По-видимому, наибольшую точность расчетов T в жидкостях можно обеспечить по методу [8], суть которого состоит в построении поверхности внутренней энергии по сетке экспериментальных кривых Гюгонио, полученных при разных начальных температурах. Однако необходимость проведения большого числа трудоемких прецизионных взрывных экспериментов затрудняет применение этого метода.

В настоящей работе температура за ФУВ в нитробензоле рассчитывалась на ЭВМ аналогично [9]. Принималась, что $(\partial p / \partial T)_V = \text{const}$ и что теплоемкость C_V нитробензола изменяется с температурой, как в идеальном газе. Необходимые термодинамические параметры исходного вещества взяты из работы [10]. Анализ имеющихся данных, в частности [8, 9, 11], показывает, что подобные расчеты в интересующей нас области давлений дают значения температур, систематически заниженных примерно на 20% главным образом из-за неучета зависимости $(\partial p / \partial T)_V$ от объема. Поэтому в результаты расчетов для нитробензола внесена соответствующая 20%-ная поправка. Окончательные данные по уравнению состояния нитробензола приведены в табл. 2.

На рис. 4 начальный участок ударной адиабаты представлен в p — T -координатах совместно с кривой плавления. Последняя экстраполирована в область высоких давлений с помощью уравнения Симона, коэффициенты которого подобраны в [12] по экспериментальным дан-

ными, полученным до давления 1,5 ГПа. Экспериментальный участок кривой плавления показан сплошной линией. Видно, что адиабата проходит в области существования твердой фазы нитробензола. При $p = 4$ ГПа переохлаждение достигает $\sim 200^\circ\text{C}$ и продолжает увеличиваться с ростом давления. Вопрос о том, успевает ли нитробензол при столь значительном переохлаждении закристаллизоваться за время эксперимента (~ 1 мкс) или остается в метастабильном жидком состоянии, может быть решен на основании экспериментов по поглощению света и диэлектрических измерений.

Таблица 2

p , ГПа	V , см ³ /моль	T , К
10^{-4}	102,3	293
1,0	89,0	410
2,0	82,0	470
3,0	77,4	530
4,0	74,1	590
5,0	71,5	650
6,0	69,4	710
7,0	67,6	770
8,0	66,1	840
9,0	64,8	900
12,9	60,9	1180

Поглощение света

Поглощение света ударно-сжатым нитробензолом изучалось в плоской геометрии с использованием высокоскоростной фоторазвертки на цветную пленку ДС-5 прошедшего через образец излучения аргонного взрывного источника. Подробности постановки экспериментов можно найти в [13]. Результаты опытов приведены на рис. 3.

Начиная с самых низких исследованных давлений на цветных фоторазвертках замечено избирательное поглощение нитробензолом си-

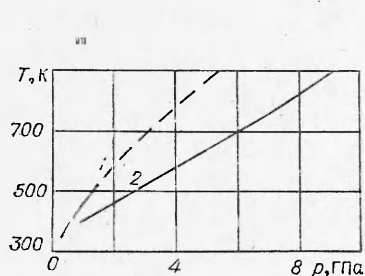


Рис. 4. Кривая плавления (1) и ударная адиабата (2) нитробензола.

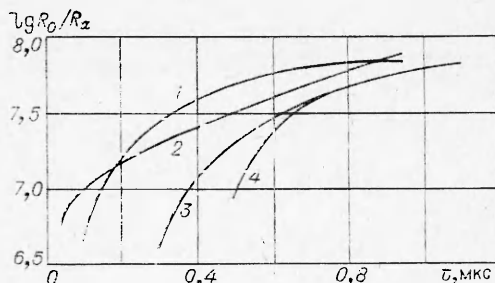


Рис. 5. Зависимость $\lg \bar{R}_0/\bar{R}_x$ от времени. Давление за ФУВ, ГПа: 1 — 15,4, 2 — 14,4, 3 — 13, 4 — 11. 1 — волна спадающего профиля; 2, 3, 4 — прямоугольный профиль ударной волны.

ней части спектра источника света без потери прозрачности. С ростом давления этот эффект становился все более выраженным. По-видимому, он связан со сдвигом собственного поглощения нитробензола при сжатии в область длинных волн.

Аналогично другим органическим жидкостям [14] до аномалии на кривой динамической сжимаемости при 13 ГПа нитробензол остается прозрачным. Резкое поглощение света по всему видимому спектру начинается в области излома и при $p > 13$ ГПа происходит менее, чем за 0,1 мкс. Поскольку показатели преломления твердой и жидкой фаз должны различаться, отсутствие потери прозрачности при $p < 13$ ГПа говорит о том, что в этих условиях нитробензол остается в метастабильном жидком состоянии. Как будет показано ниже, поглощение света при $p > 13$ ГПа также не может быть приписано замерзанию. В связи с этим интересно отметить, что экстраполяция данных [12] по зависимости скачка объема при плавлении нитробензола от температуры в область аномалии на ударной адиабате дает $\Delta V_{пл} = 0,23$ см³/моль, что примерно на порядок меньше экспериментального значения.

Электропроводность

Удельная электропроводность Σ нитробензола за ФУВ измерялась при помощи электрической схемы и экспериментальных ячеек, описанных в [1], позволяющих в данном случае регистрировать $\Sigma > 5 \cdot 10^{-6}$ Ом⁻¹·м⁻¹. Ячейка представляла собой конденсатор, образованный «заземлением» алюминиевым экраном диаметром 80 и толщиной 8 мм и электродом диаметром 20 мм. Последний изготавливался из алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. Электрод располагался в жидкости параллельно экрану на расстоянии от него $x_0 = 3$ мм. В опытах ФУВ проходил последовательно через экран, образец и электрод. Таким образом, вектор электрического поля был параллелен вектору скорости ударной волны. Для отметки на осциллограммах момента входа ФУВ в образец использовался контактный датчик.

По определенной из экспериментов зависимости электрического сопротивления ячейки от времени $R_x(t)$ можно рассчитать среднюю по координате удельную электропроводность:

$$\Sigma_{\text{ср}} = x_0 (\sigma R_x S)^{-1},$$

где S — площадь электрода; σ — сжатие.

Некоторые экспериментальные кривые в координатах $\lg R_0/R_x - t$ приведены на рис. 5. Здесь $R_0 = 10^7$ Ом — исходное сопротивление ячейки. Опыты позволили установить, что зависимость электропроводности нитробензола от давления имеет пороговый характер. При идентичных с измерениями динамической сжимаемости условиях ударного нагружения (время измерения, профиль волны) давление начала возникновения электропроводности совпадает с изломом на ударной адиабате. До $p = 13$ ГПа нитробензол остается хорошим диэлектриком ($\Sigma < 5 \cdot 10^{-6}$ Ом $^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). При $p > 13$ ГПа наблюдалось резкое увеличение электропроводности с ростом давления, причем, как видно из рис. 5, при фиксированном начальном давлении сопротивление образца продолжает уменьшаться во времени после прохождения по нему ФУВ. По-видимому, этот факт свидетельствует о том, что обнаруженное превращение является химической реакцией с образованием проводящих в условиях высоких давлений и температур продуктов, а зависимость $R_x(t)$ отражает ее кинетику.

Для оценки величины Σ конечных продуктов превращения проведена серия экспериментов с ударными волнами прямоугольного профиля (см. рис. 5). Это позволило исключить влияние спада давления за ФУВ на протекание реакции. Полученные зависимости были экстраполированы к $t = \infty$ в координатах $\lg \frac{1}{R_x} - \frac{1}{t}$. Величины Σ_{∞} при давлениях 11, 13 и 14,4 ГПа оказались соответственно равными 54, 60 и 130 Ом $^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Интересно, что заметная электропроводность в сжатом образце возникает не сразу за ФУВ, а спустя некоторое время задержки (период индукции). Это время уменьшается от 0,45 мкс при $p = 11$ ГПа до величины меньше 0,02 мкс при $p = 14,4$ ГПа.

Диэлектрические измерения

Статическая диэлектрическая проницаемость ϵ_s и время релаксации ориентационной поляризации τ характеризуют фазовое состояние и структуру ближнего порядка полярной жидкости. В частности, известно [15], что кристаллизация нитробензола приводит к «замораживанию» молекулярного вращения и, как результат, — к падению ϵ_s в 12 раз. Поэтому измерение ϵ_s за ФУВ должно дать однозначный ответ о том, находится ли сжатый образец в твердом или жидком состоянии.

Обработка данных диэлектрических измерений в рамках теории Онзагера — Кирквуда — Фрелиха [16] позволяет рассчитать так называемый корреляционный фактор Кирквуда g , величина которого дает информацию о наличии в жидкости молекул, связанных в группы. Если предположить, что имеет место равновесие между мономерными молекулами и дипольными антипараллельными парами, то, зная g , по формуле [17]

$$\alpha = 2(1-g)(2-g)^{-1}$$

легко рассчитать долю α ассоциированных молекул.

Величины ϵ_s и τ нитробензола за ФУВ измерялись на частотах 6—7 МГц методом колебательного контура [18, 19] в интервале давле-

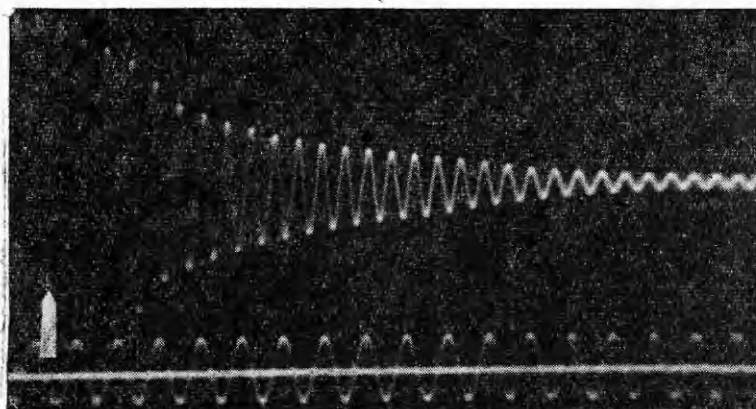


Рис. 6. Экспериментальная осциллограмма; частота калибровочной синусоиды 5 МГц. Стрелкой показан момент входа ударной волны в ячейку.

ний 1,1—11,3 ГПа. При более высоких давлениях резкий рост электропроводности образца делал проведение диэлектрических измерений невозможным. Процедура калибровки схемы и соотношение расчета для τ приведены в работе [20], конструкция экспериментальной ячейки — в [1]. Типичная осциллограмма колебательного процесса показана на рис. 6. Результаты экспериментов и расчетов приведены в табл. 3. Зависимость величины ϵ_∞ от степени сжатия находилась аналогично [20]. При расчетах g предполагалось, что дипольный момент молекул нитробензола $\mu_0 = 1,404 \cdot 10^{-29}$ Кл. м [21] не меняется при сжатии.

Полученные значения величин ϵ_s и τ свидетельствуют о сохранении во всем исследованном диапазоне динамических давлений высокой вращательной подвижности молекул нитробензола. Это подтверждает сделанный выше на основании экспериментов по поглощению света вывод о том, что в течение времени наблюдения сжатый нитробензол находится в метастабильном жидком состоянии.

Наблюдаемое уменьшение g -фактора при ударном сжатии нитробензола свидетельствует о появлении в нем молекулярных ассоциатов — квадруполов. При давлениях 3,4—11,3 ГПа их концентрация достигает $\sim 40\%$. Следуя [22], эти ассоциаты можно трактовать как микроразродыши новой фазы.

Т а б л и ц а 3

p , ГПа	T , К	ϵ_s	ϵ_∞	$\tau \cdot 10^9$, с	g	α , %
10^{-4}	293	35,8	2,43 [21]	0,049	0,98	4
1,1	420	32,0	2,77	0,15	0,92	15
1,28	430	31,0	2,81	0,21	0,88	21
3,4	550	28,8 (28,5)	3,15	1,10 (1,53)	0,79	35
4,2	600	27,8	3,25	1,74	0,77	37
5,1	650	26,5 (28,0 *)	3,34	—	0,77	37
6,1	720	25,9	3,43	2,12	0,75	40
7,3	790	25,5	3,53	1,68	0,76	39
9,2	920	24,2	3,65	1,55	0,76	39
9,5	940	22,0 *	3,67	—	0,69	47
11,3	1060	20,2 (21,0)	3,77	1,14	0,68	48

* Измерения амплитудным методом на частоте ~ 3 МГц [18].

Таблица 4

Ударная поляризация

p , ГПа	E , В	$P_0 \cdot 10^4$, Кл/м ²
1,5	1,0	3,0
2,0	2,0	3,51
3,4	8,8	6,85
4,2	15,3	8,54
5,1	17,5	8,98
7,3	22,4	10,9
9,2	31,5	15,1
	31,5	15,1
11,3	29,7	
	29,1	16,2
	32,1	

Независимые измерения ЭДС ударной поляризации E , ϵ_s и τ позволяют рассчитать [20] удельную поляризацию P_0 , создаваемую ударным фронтом. Эта величина характеризует степень ориентации молекул в поле сил ФУВ и напряженность электрического поля вблизи фронта. ЭДС ударной поляризации измерялась в режиме «разомкнутого» поляризационного датчика полностью аналогично работе [20]. Поскольку в нашем случае условие быстрой релаксации $x_0/U \gg \epsilon_\infty/\epsilon_s \cdot \tau$ оказывается выполненным, следуя [20] можно записать

$$P_0 = E \epsilon_0 \epsilon_s \sigma (U \tau)^{-1}.$$

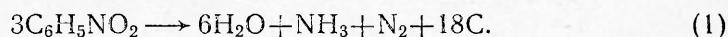
Экспериментальные значения E и расчетные P_0 даны в табл. 4. Видно, что начальная поляризация нитробензола является монотонно возрастающей функцией давления. В пределах экспериментальных ошибок она может быть описана квадратичным соотношением $P_0 = 1,04 \cdot 10^{-5} + 2,04 \cdot 10^{-4} p - 5,41 \cdot 10^{-6} p^2$. Рассчитанная из величины P_0 максимальная напряженность электрического поля на ФУВ с амплитудой 11,3 ГПа составила примерно 250 кВ/см.

Обсуждение результатов

Как следует из приведенных выше экспериментов для нитробензола при ударном сжатии характерны две качественно отличные области поведения. До давления 13 ГПа, соответствующего первому излому на ударной адиабате, нитробензол за время наблюдения не претерпевает заметных химических изменений. Несмотря на значительное переохлаждение, достигающее 200°С и более, он остается в метастабильном жидком состоянии. Статическая диэлектрическая проницаемость с ростом давления падает за счет увеличения температуры и концентрации антипараллельных молекулярных димеров. Наведенная ударным фронтом электрическая поляризация релаксирует к равновесному нулевому значению за время порядка 1 нс.

Начиная с динамического давления примерно 13 ГПа в нитробензоле развивается быстрая химическая реакция (пиролиз), приводящая к уменьшению объема. Совпадение по давлению излома кривой динамической сжимаемости и начала потери прозрачности образца (см. рис. 3) свидетельствует [14] о единой причине этих изменений — выделении новой, более плотной обогащенной углеродом фазы, поглощающей и рассеивающей свет (смолы, сажа, графит).

Разумно предположить, что реакция пиролиза в сжатом нитробензоле по составу конечных продуктов близка к реакциям взрывчатого превращения нитросоединений. Гипотетически она может быть записана, например, следующим образом:



При этом электропроводность продуктов (1) естественно объяснить [23] диссоциацией на ионы входящей в их состав воды.

Чистая вода, ударно-сжатая до давления 12,1 ГПа, имеет удельную электропроводность 56 Ом⁻¹·м⁻¹ [24]. Объемная доля воды в продук-

тах (1) составляет $\sim 30\%$. Это приводит к оценке для Σ продуктов $\sim 20 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, что в 3 раза меньше экспериментально наблюдаемой величины. Однако учитывая, что реакция (1) экзотермическая и что повышение температуры приводит к росту степени диссоциации воды [25], полученную оценку можно считать хорошо согласующейся с экспериментом.

В рамках сделанного предположения о составе продуктов реакции нитробензола зарегистрированные профили электропроводности за ФУВ (см. рис. 5) отражают кинетику накопления воды в продуктах. Наблюдаемые при этом выраженные периоды индукции, вообще говоря, могут возникнуть за счет разных механизмов, например нескольких последовательных реакций или теплового взрыва. Однозначный выбор между этими механизмами в настоящее время затруднен.

Интересно, что динамическое давление начала пиролиза нитробензола (13 ГПа) совпадает с порогом инициирования детонации жидкого тринитротолуола [26] и давлением начала пиролиза бензола [14, 27]. Это может указывать на то, что начальным актом химических превращений ароматических нитросоединений при ударном сжатии является распад бензольного кольца (см. также [28]), а не разрыв связи C—N, характерный (например, [29]) для обычного высокотемпературного пиролиза.

Поступила в редакцию
25/IV 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Якушев, С. С. Набатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 4.
3. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин. Докл. АН СССР, 1958, 121, 1.
4. Л. В. Альтшулер, М. И. Бражник, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1971, 6.
5. R. J. Eichelberger, G. E. Hauver. Colloq. Internat. Centre. Nat. Rech. Sci., 1962, 109.
6. В. В. Якушев. ПМТФ, 1972, 4.
7. А. Г. Антипенко, С. С. Набатов, В. В. Якушев. ФГВ, 1975, 11, 3.
8. P. C. Lysne, D. R. Hardesty. J. Chem. Phys., 1973, 59, 12.
9. M. Cowperthwaite, R. Shaw. J. Chem. Phys., 1970, 53, 2.
10. А. В. Корабельников, Н. Ф. Отпущенников, О. П. Иванова. Науч. тр. Курского гос. пед. ин-та, Т. 7, 1972.
11. P. C. Lysne. J. Chem. Phys., 1971, 55, 11.
12. М. К. Жоховский, В. С. Богданов, Е. М. Иванова.— В сб.: Исследования в области высоких давлений. Тр. ВНИИФТРИ, вып. 104, 164, М., Стандартгиз, 1969.
13. O. B. Yakusheva, V. V. Yakushev, A. N. Dremin. High Temp.-High Press., 1971, 3, 3.
14. О. Б. Якушева, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ЖФХ, 1977, 60, 7.
15. Я. Ю. Ахадов. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М., Стандартгиз, 1972.
16. Г. Фрелих. Теория диэлектриков. М., ИЛ, 1960.
17. W. Danhauser, A. F. Flueckiger. J. Phys. Chem., 1964, 68, 7.
18. В. В. Якушев, С. С. Набатов, А. Н. Дремин.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
19. С. С. Набатов, В. В. Якушев. Метрология, 1976, 9, 62.
20. С. С. Набатов, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ФГВ, 1976, 12, 2.
21. М. И. Шахпаронов. Методы исследования теплового движения молекул и строения жидкостей. М., МГУ, 1963.
22. В. С. Ушакова, И. В. Жиленков, Г. М. Журавей. ЖФХ, 1974, 48, 7.
23. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. Докл. АН СССР, 1975, 221, 5.
24. S. D. Hamann, M. Linton. Trans. Faraday Soc., 1966, 62, 8.
25. W. Holzappel, E. V. Frank. Ber. Bunsenges. Phys. Chem., 1966, 70, 1105.
26. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
27. R. D. Dick. J. Chem. Phys. 1970, 52, 12.
28. Л. В. Бабарэ, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1969, 5, 4.
29. E. K. Fields, S. Meyerson. J. Amer. Chem. Soc., 1967, 89 (13), 3224.