

УДК 541.64:542.62:546.23

**В. Д. АЛЕКСАНДРОВ^а, Ш. К. АМЕРХАНОВА^б, Б. ИБРАГИМОГЛЫ^с, А. Е. ПОКИНТЕЛИЦА^а,
Е. А. ПОКИНТЕЛИЦА^а**^а Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ^б Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова, ^с Гази университет, Анкара, Турция

ЭФФЕКТЫ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ БЕНЗОЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ

В данной работе методом термического анализа исследованы фазовые превращения бензола под действием внешнего давления. Изучено влияние давления на параметры кристаллизации переохлажденного расплава. Установлено увеличение температуры плавления, температуры равновесной кристаллизации и уменьшение переохлаждения по мере роста давления. Обнаружен эффект небольшого падения давления при фазовом превращении. За счет этого падения обнаружен твердофазный переход при 90К. Результаты трактуются на основании структуры бензола в жидком и твердом состояниях.

бензол, плавление, кристаллизация, переохлаждение, полиморфное превращение, давление, всесторонне сжатие, плотность

ВВЕДЕНИЕ

Бензол является типичным представителем углеводородов ароматического ряда и служит объектом для многих экспериментальных и теоретических исследований [1–3]. Нами неоднократно проводились эксперименты по изучению кинетики кристаллизации бензола в нормальных условиях [4]. Однако в литературе практически отсутствуют одновременные исследования кристаллизации и твердофазных превращений в бензоле.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований фазовых превращений бензола под действием статических высоких давлений как в области температуры плавления, так и в области низких температур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки [5].

До проведения экспериментов вся система вакуумировалась. Измерительный сосуд (4) наполнялся чистым (99,99 %) бензолом объемом 10 см³. До начала охлаждения в системе создавалось соответствующее давление. С целью сохранения для всех опытов одинаковой скорости охлаждения 0,85 К/с осуществлялся контроль подачи паров азота или гелия из контейнера Dewar (5) с помощью вакуумного насоса (7) в медную трубу (14). Скорость подачи паров контролировали регулятором (6). Давление в системе осуществлялось с помощью пневматического пресса МР-2500 (1). Температуру регистрировали в координатах температура T – время t при фиксированных давлениях. Для измерения температуры использовали ХК-термопару с погрешностью 0,2 К. Термопара непосредственно находилась в образце бензола. Давление измерялось грузопоршневым манометром. Погрешность измерения давлений составила 0,01 %.

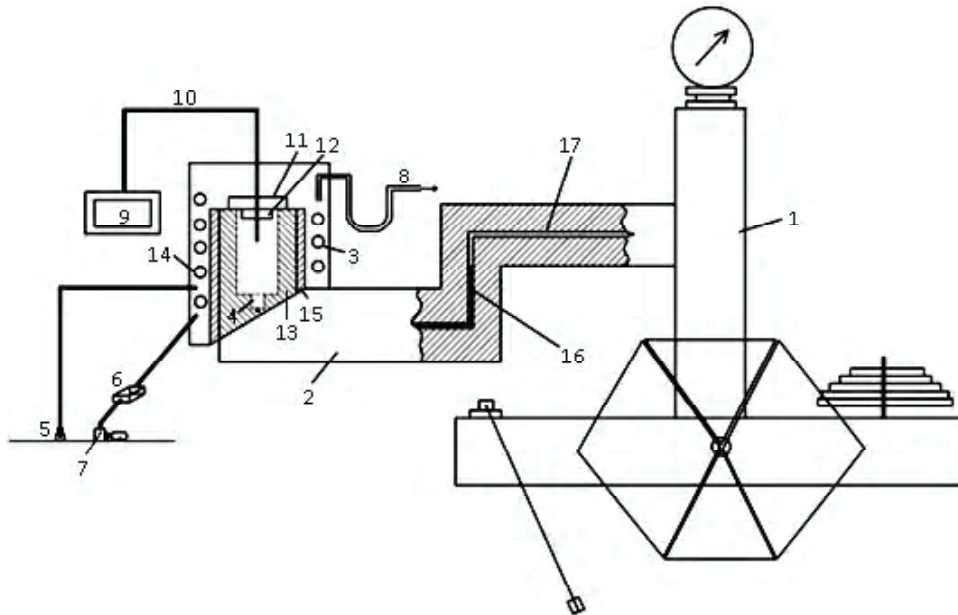


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – манометр МП-2500; 2 – устройство сжатия; 3 – хладагент; 4 – измерительный контейнер; 5 – контейнер Dewar для жидкого азота; 6 – регулятор; 7 – вакуумная pompa; 8 – расходомер; 9 – потенциометр КСП-4; 10 – термопары; 11 – серпантин (капиллярная трубка катушки); 12 – крышка; 13 – стенки контейнера; 14 – нагреватель; 15 – кожух; 16–17 – пневмоканылы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе изучали влияние давлений от 500 до 2 300 атм на кристаллизацию бензола методом термического анализа в координатах температура T – время t . С помощью экспериментальной установки (рис. 1) измеряли и контролировали следующие параметры метастабильного состояния бензола: давление p , температуру контейнера, температуру замерзания T_b (т. е. температуру кристаллизации), температуру T_c в нижней точке метастабильного состояния, переохлаждение $\Delta T^- = T_b - T_c$ относительно температуры замерзания, перепад давлений Δp на начальной стадии взрывной кристаллизации, инкубационный период пребывания жидкого бензола в метастабильном (переохлаждённом) состоянии, t_2 – время резкого перехода от метастабильного состояния в кристаллическое, t_3 – время изотермического замерзания, общее время t начала и завершения всего процесса затвердевания ($t = t_1 + t_2 + t_3$).

На рис. 2 приведены некоторые термограммы, характеризующие процесс кристаллизации бензола при разных внешних давлениях.

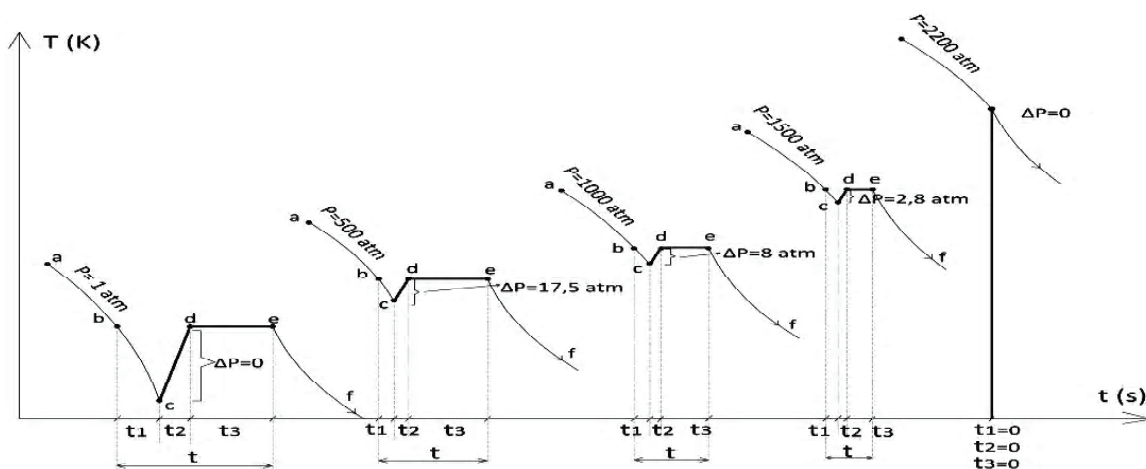


Рисунок 2 – Термограммы, записанные при давлениях $p = 1; 500; 1\,000; 1\,500$ и $2\,200$ атм. Показаны переохлаждения ΔT^- и перепады давлений Δp на границах метастабильного состояния.

В табл. 1 сведены средние значения особых точек при 24 разных давлениях. В этой таблице показаны температуры T_b , T_c , T_d , T_e , соответствующие точкам b , c , d , e на термограммах, промежутки времени t_1 , t_2 , t_3 , t .

Таблица 1 – Параметры метастабильного состояния бензола и его замерзания по термограммам

p , atm	T_b , К	T_c , К	ΔT^- , К	$T_d = T_e$, К	p_c , atm	p_d , atm	Δp , atm	t_1 , s	t_2 , s	t_3 , s	t , s
1	278,5	258,5	20,0	278,5	–	–	–	160	~6,0	260	426
100	279,0	267,0	13,0	279,0	100	68	32,0	131	~3,0	210	343
200	280,0	270,0	10,0	280,0	200	173	27,0	112	~2,5	180	294
300	282,8	274,6	8,2	282,8	300	277	23,0	97	~2,0	155	254
400	284,8	277,8	7,0	284,8	400	380	20,0	85	~2,0	135	222
500	286,7	280,7	6,0	286,7	500	482,5	17,5	72	~2,0	115	189
600	289,5	284,5	5,0	289,5	600	585	15,0	61	~1,5	97	159
700	291,2	287,2	4,0	291,2	700	687	13,0	53	~1,5	85	139
800	294,8	291,2	3,6	294,8	800	788,5	11,5	44	~1,5	70	115
900	297,0	293,8	3,3	297,0	900	890,5	9,5	37	~1,5	60	98
1 000	299,5	296,6	2,9	299,5	1 000	992	8,0	31	~1,0	50	82
1 100	302,5	300,1	2,4	302,5	1 100	1 093,3	6,7	25	~1,0	40	66
1 200	305,3	303,3	2,0	305,3	1 200	1 194,5	5,5	22	~1,0	35	58
1 300	308,0	306,2	1,8	308,0	1 300	1 295,8	4,2	18	~1,0	30	49
1 400	312,2	310,7	1,5	312,2	1 400	1 396,4	3,6	16	~1,0	25	42
1 500	315,5	314,3	1,1	315,5	1 500	1 497,2	2,8	12	~1,0	19	32
1 600	320,1	319,2	0,9	320,1	1 600	1 598,1	1,9	8	~1,0	14	23
1 700	324,0	323,3	0,7	324,0	1 700	1 698,8	1,2	6	~0,5	10	16
1 800	328,0	327,5	0,5	328,0	1 800	1 799,4	0,6	4	~0,5	6	10
1 900	333,5	333,2	0,3	333,5	1 900	1 899,8	0,2	2	0,5	4	6
2 000	340,5	340,4	0,1	340,5	2 000	1 999,9	0,1	1	~0,5	2	3
2 100	347,0	347,0	0	347,0	2 100	2 100	0	0,5	0	1	1
2 200	356,0	356,0	0	356,0	2 200	2 200	0	0	0	0	0
2 300	368,0	368,0	0	368,0	2 300	2 300	0	0	0	0	0

Из этой таблицы видно, что по мере увеличения давления температура плавления T_L (в точке b) и соответственно температуры равновесной кристаллизации в точках d и e растут, а остальные параметры (ΔT^- и времена t_1 , t_2 , t_3 , t) закономерно убывают.

Параметры плавления и кристаллизации в зависимости от давления p описываются эмпирическими уравнениями $f(p) = A + Bp + Cp^2$, где A , B , C – const.

Анализ показывает, что кривые $T_b = f(p)$, $T_c = f(p)$, $\Delta T^- = f(p)$ сходятся к одной точке M (рис. 3).

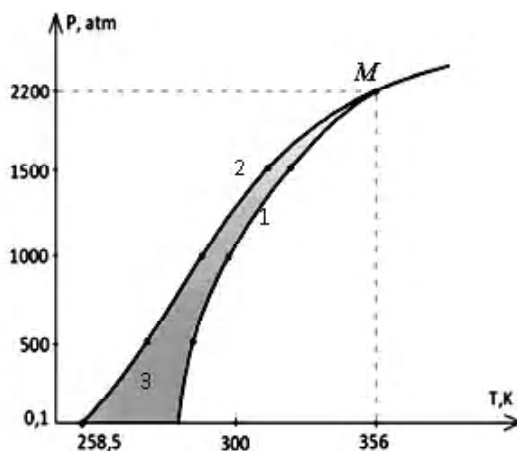


Рисунок 3 – Вид кривых: 1 – $T_b = f(p)$, 2 – $T_c = f(p)$, 3 – $\Delta T^- = f(p)$.

Кроме перечисленных закономерностей, установлено также, что в процессе адиабатных переходов от температуры T_c до температуры T_d фиксируются небольшие падения давлений Δp (табл. 1 и рис. 2). Причём по мере увеличения внешнего давления p значение Δp также уменьшается до нуля в точке M .

Повышение температуры замерзания T_b (T_d , T_e) в зависимости от давления, в принципе, подчиняется известному закону Клапейрона-Клаузиуса, согласно которому с ростом давления увеличивается температура фазового превращения. Что касается уменьшения основных параметров метастабильного состояния бензола (ΔT , Δp , t_1 , t_3 , t) под действием внешнего давления, здесь следует обратиться к структуре самого бензола. Под действием давления C_6H_6 , молекулы бензола могут в принудительном порядке встраиваться в упорядоченную кристаллическую решётку. Тем самым уменьшаются степень переохлаждения, инкубационный период зарождения новой фазы и время замерзания. В критической точке M исчезает разница между жидкой и твердой фазами.

Падение давления Δp на участке cd при адиабатном процессе (рис. 2) может быть связано с изменениями плотности бензола при фазовом превращении. Оценки показывают, что относительные значения плотностей $\Delta \rho / \rho_s$ ($\Delta \rho = \rho_s - \rho_L$) близки к относительным падениям давления $\Delta p / p$. Так, например, величина $\Delta \rho / \rho_s = 0,093$ при плотности жидкого бензола $\rho_L = 0,88$ г/см³ и плотности твердого бензола $\rho_s = 0,97$ г/см³ при нормальном давлении [6]. А отношения $\Delta \rho / p$ при 300 атм составляет 0,077, при 400 атм – 0,050 и т. д. Учитывая сказанное выше, решено было установить тенденцию изменения плотности $\rho_L = \rho_s (1 - (\Delta \rho / \rho_s))$ в зависимости от относительного перепада давления при адиабатном процессе. Если принять $\Delta p / p \approx \Delta \rho / \rho_s$, то соответственно получим $\rho_L \approx \rho_s (1 - (\Delta p / p))$.

На основании полученных данных были построены графики зависимости плотности ρ_L (рис. 4) при различных значениях внешнего давления p .

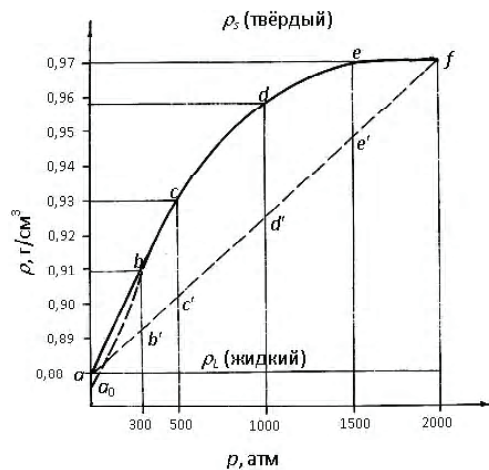


Рисунок 4 – Зависимость плотности бензола в метастабильной области в зависимости от давления:
 ———— – расчетная по пути $abcdef$; - - - - - аддитивная по пути $a'b'c'd'e'f'$.

Как видно из этих рисунков, с увеличением внешнего давления p плотность переохлажденного бензола растет от значений, соответствующих жидкому состоянию, до значений, соответствующих твердому состоянию по пути $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$. Установленная закономерность достаточно хорошо вписывается в известные уравнения Тейта [7]. Полученные изменения $\rho_L \rightarrow \rho_s$ свидетельствуют о том, что установленные в работе закономерности в первую очередь связаны с фазовым переходом метастабильная жидкость \rightarrow твердое тело.

На втором этапе исследовали твердофазное превращение бензола под действием внешних давлений до 1 000 атм при непрерывном понижении температуры от 300 до 50 К. В результате исследований, проведенных в условиях непрерывного охлаждения бензола, находящегося под давлением от 150 до 1 000 атм, было установлено два эффекта падения давления Δp . Первый, как и прежде, происходил относительно температуры плавления Δp_L , а второй Δp_K – при низкой температуре T_K , свидетельствующий о некоем твердофазном превращении бензола.

Для демонстрации эффекта падения давления Δp_K при низких температурах приведём в качестве примера термограмму охлаждения бензола под давлением 200 атм в координатах температура T – время t (рис. 5).

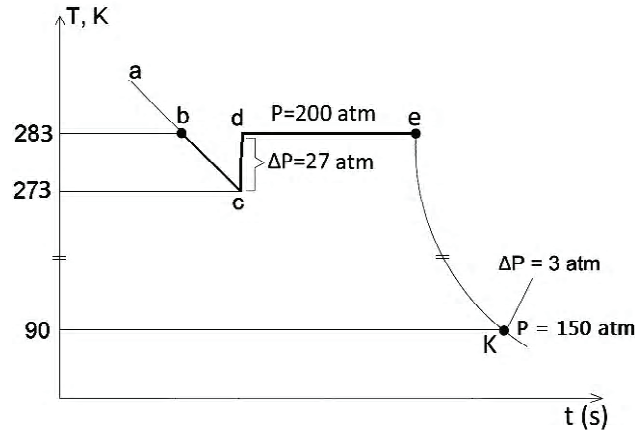


Рисунок 5 – Термограмма охлаждения бензола с фазовыми превращениями при температурах $T = 286,7$ К и $T = 90$ К, ($p = 200$ атм).

На этой термограмме совмещены два фазовых превращения – кристаллизация по пути $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ в интервале температур от 270 до 280 К и эффект предполагаемого твёрдофазного превращения, происходящего при 90 К. Особенность последнего эффекта заключается в том, что при этой температуре T_K (в точке K) фиксируется небольшое падение давления $\Delta p_K \approx 3$ атм. Если падение давления в точке K связано с фазовым превращением, то по значениям Δp_L и Δp_K можно оценить тепловой эффект твёрдофазного превращения по формуле $\Delta H_K = \Delta H_L \Delta p_K / \Delta p_L \approx 1,11$ кДж/моль, где ΔH_L – энтальпия плавления бензола [6]. Поскольку в координатах $T-t$ в точке K никаких изменений не наблюдается, то фазовые превращения с учётом падения давления удобнее показывать в координатах давление p – температура T (рис. 6).

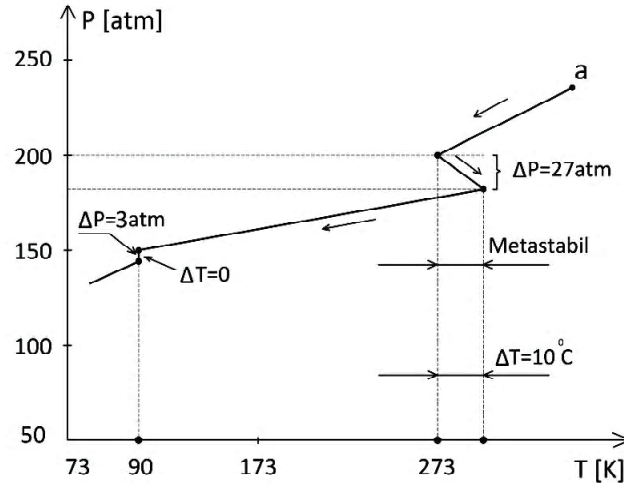


Рисунок 6 – Фазовые превращения на диаграмме $p-T$ при $p = 200$ атм и 150 атм.

На этом рисунке изображены эффект падения давления Δp_L относительно T_L , адиабатный эффект прогрева расплава на величину ΔT^- от T_{\min} до T_L при кристаллизации в виде ломаной линии (показаны стрелками), а также эффект падения давления Δp_K при $T_K = 90$ К (в точке K) в виде вертикальной прямой вдоль оси p .

В таблице 2 приведены параметры кристаллизации и твёрдофазного превращения бензола, зависящие от высшего давления: температуры плавления T_L , переохлаждения ΔT_L^- относительно T_L , температуры T_K полиморфного перехода, падения давления Δp_L относительно T_L и Δp_K относительно T_K .

Таблица 2 – Параметры фазовых превращений бензола под давлением

p , атм	T_L , К	ΔT_L^- , К	Δp_L , атм	T_K , К	ΔT_K^- , К	Δp_K , атм
1	278,5	20,0	–	–	–	–
150	281,2	11,5	29,5	90,0	–	1–3
250	281,8	9,1	25,0	93,5	–	1–3
500	286,7	6,0	17,5	102,3	–	1–3
750	293,5	4,5	12,7	111,2	–	1–3
1 000	299,5	2,9	8,0	120,6	–	1–3

Из этой таблицы виден рост температур T_L и T_K , уменьшение ΔT_K^- и Δp_L по мере увеличения давления при кристаллизации. Что касается твёрдофазного превращения при температуре T_K , то при всех давлениях переохлаждений ΔT_K^- относительно T_K не наблюдалось, но при этом при всех давлениях при T_K фиксировалось небольшое падение давления 1–3 атм.

Приемлемой диаграммой для пояснения твёрдофазного превращения можно ориентировочно считать диаграмму [8] (рис. 7).

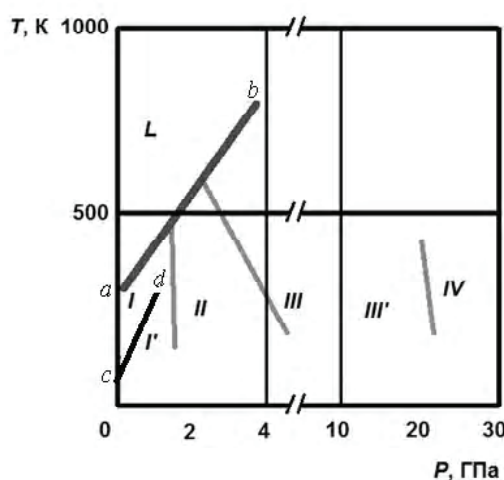


Рисунок 7 – Фазовые превращения на диаграмме p – T при $p = 200$ и 150 атм. Фазовая диаграмма бензола [6]. На диаграмме I и I' – ромбические структуры P_{bca} , II – предположительно моноклинная структура, III и III' – моноклинные структуры $P2_1/c$, IV – полимер.

На этой диаграмме при низких температурах (ниже 130 К) имеется линия cd , разграничивающая твёрдофазный переход $I \rightarrow I'$ при давлениях $< 0,1$ ГПа. Поскольку между линией ab , разграничивающей твёрдую и жидкую фазу, и линией cd других фазовых переходов не указано, то можно считать, что твёрдая фаза I соответствует гранцентрированной ромбической решётке с параметрами $a = 7,46$; $b = 9,67$; $c = 7,03$ Å; $V = 507,1$ Å³ в нормальных условиях [8]. Модификация же I' также является ромбической, но с несколько сжатыми параметрами $a \approx 7,24$; $b \approx 9,31$; $c \approx 6,76$ Å; $V \approx 455,6$ Å³ [8]. Как видим, возможный скачок объёма на ~ 10 % с выделением теплоты $\Delta H_K \approx 1,11$ кДж/моль явно указывает на фазовое превращение I -го рода, а именно полиморфный переход $I \rightarrow I'$ при температуре T_K . Что касается перестройки молекул бензола в твёрдой фазе, то возможно под давлением «укладка» молекул C_6H_6 становится более плотной [9–10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glasstone, S. Theoretical Chemistry [Текст] / S. Glasstone. – New York : Boston College, 1948. – 632 p.
2. Китайгородский, А. И. Молекулярные кристаллы [Текст] / А. И. Китайгородский. – М. : Наука, 1971. – 424 с.
2. Debnedetli, P. G. Metastable Liquids: Concepts and Principles [Текст] / P. G. Debnedetli. – Princeton : Princeton University Press, NJ, 1996. – 411 p.
3. Александров, В. Д. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлаждённой жидкости и аморфных сред [Текст] / В. Д. Александров. – Донецк : Донбасс, 2011. – 592 с.
4. Azreg-Ainou, M. Phase equilibrium and metastability of liquid benzene at high pressures [Текст] / M. Azreg-Ainou, А. Ньсейнов, В. Ibrahimoglu // J. of Chemical Physics. – 2006. – V. 124. – P. 204505–204511.

5. Таблица физических величин [Текст] : Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.
6. Вервейко, В. Н. Анализ применимости уравнения Тейта к различным классам веществ в конденсированном состоянии [Текст] / В. Н. Вервейко, М. В. Вервейко, Ю. Ф. Мелихов // Ученые записки Курского гос. ун-та (электронный вариант). – 2006. – № 1. – С. 45–58.
7. Tonkov, E. Yu. High Pressure Phase Transformations [Текст] : A Handdook. Vol. 3 / E. Yu. Tonkov. – Philadelphia : Gordon and Breach SA, 1992. – P. 36.
8. Budzianowski, A. Presse-frozen benzene I revisited [Текст] / A. Budzianowski, A. Katrusiak // Acta Crystallographica Section B. – 2006. – V. 62. – P. 95.
9. Китайгородский, А. И. Молекулярные кристаллы [Текст] / А. И. Китайгородский – М. : Наука, 1971. – 404 с.
10. Zhu, Q. Crystal structure prediction and its application in Earth and materials sciences [Текст] : PhD dissertation / Q. Zhu. – Stony Brook, 2013. – 149 p.

Получено 09.12.2014

В. Д. АЛЕКСАНДРОВ ^a, Ш. К. АМЕРХАНОВА ^b, Б. ИБРАГИМОГЛИ ^c,
А. Є. ПОКИНТЕЛИЦЯ ^a, О. А. ПОКИНТЕЛИЦЯ ^a

ЕФЕКТИ ПАДІННЯ ТИСКУ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ФАЗОВІ
ПЕРЕТВОРЕННЯ БЕНЗОЛУ ПІД ДІЄЮ ВСЕБІЧНОГО СТИСНЕННЯ

^a Донбаська національна академія будівництва і архітектури, ^b Карагандинський
державний університет ім. Є. А. Букетова, ^c Газі університет, Анкара, Туреччина

У даній роботі методом термічного аналізу досліджували фазові перетворення бензолу під дією зовнішнього тиску. Вивчався вплив тиску на параметри кристалізації переохолодженого розплаву. Встановлено збільшення температури плавлення, температури рівноважної кристалізації і зменшення переохолодження в міру зростання тиску. Виявлено ефект невеликого падіння тиску при фазовому перетворенні. За рахунок цього падіння виявлений твердофазний перехід при 90 К. Результати трактуються на підставі структури бензолу в рідкому і твердому станах.

бензол, плавлення, кристалізація, переохолодження, поліморфне перетворення, тиск, всебічне стискання, густина

VALERY ALEXANDROV ^a, SHAMSHIYA AMERKHANDOVA ^b,
BEYCAN IBRAHIMOGLU ^c, ARTEM POKYNTELYTSIA ^a,
OLENA POKYNTELYTSIA ^a

EFFECTS OF PRESSURE DECAY DURING PHASE TRANSITION IN
UNIFORMLY COMPRESSED BENZENE

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, ^b E. A. Buketov Karaganda National University, ^c Mechanical Engineering Department, Ghazi University, Ankara, Turkey

In present paper the phase transitions in benzene at pressures up to 2 300 atm. were studied by thermal analyses. Crystallization of overheated melt were analyzed. It was found that the melting temperature and equilibrium crystallization temperature are increased crystallization together with increase, while the overcooling is decreased. The effect of small pressure decay (~3 atm.) during the phase transformation in solid benzene at 90 K was observed. It is concluded that the nature of phenomenon is established by benzene structure.

benzene, melting, crystallization, hypothermia, polymorphic transformation, pressure, hydrostatic compression, the density

Александров Валерій Дмитрович – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри фізики та фізичного матеріалознавства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: аналіз фізико-хімічних основ кінетики процесів кристалізації речовин.

Амерханова Шамшія Кенжегазіновна – доктор хімічних наук, професор кафедри фізичної і аналітичної хімії Карагандинського державного університету ім. Є. А. Букетова. Наукові інтереси: фізико-хімічні дослідження процесів комплексоутворення важких, благородних металів і РЗЕ з різними низькомолекулярними і високомолекулярними органічними сполуками; розробка наукової бази для використання високоефективних вітчизняних флотореагентів з метою збагачення корисних копалин; синтез і дослідження плівок на основі водорозчинних полімерів, модифікованих наночастинками срібла, рідкоземельними елементами (самарій, європій).

Бейджан Ибрагимоглы – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной механики университета Гази. Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ; физика плазмы.

Покинтелица Артем Евгеньевич – аспирант кафедры нанوفизики Донецкого национального университета. Научные интересы: тонкопленочные покрытия, осаждение покрытий в вакууме, структура тонких пленок, наноматериалы.

Покинтелица Елена Анатольевна – аспирант кафедры физики та фізичного матеріалознавства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Научные интересы: термодинамика та кинетика фазовых перетворень.

Александров Валерий Дмитриевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и физического материаловедения Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ.

Амерханова Шамшия Кенжегазиновна – доктор химических наук, профессор кафедры физической и аналитической химии Карагандинского государственного университета им. Е. А. Букетова. Научные интересы: физико-химические исследования процессов комплексообразования тяжелых, благородных металлов и РЗЭ с различными низкомолекулярными и высокомолекулярными органическими соединениями; разработка научной базы для использования высокоэффективных отечественных флотореагентов в целях обогащения полезных ископаемых; синтез и исследование пленок на основе водорастворимых полимеров, модифицированных наночастицами серебра, редкоземельными элементами (самарий, европий).

Бейджан Ибрагимоглы – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной механики университета Гази. Научные интересы: изучение физико-химических основ кинетики процессов кристаллизации веществ; физика плазмы.

Покинтелица Артем Евгеньевич – аспирант кафедры нанوفизики Донецкого национального университета. Научные интересы: тонкопленочные покрытия, осаждение покрытий в вакууме, структура тонких пленок, наноматериалы.

Покинтелица Елена Анатольевна – аспирант кафедры физики и физического материаловедения Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: термодинамика и кинетика фазовых превращений.

Aleksandrov Valery – DSc (Chem.), Professor, Head of the Physics and Physical Material Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances.

Amerkhanova Shamshiya – DSc (Chem.), Professor, Physical and Analytical Chemistry Department, Buketov Karaganda National University. Research interests: physical-chemical studies of the complexation processes of heavy, precious metals and rare-earth elements with a variety of low molecular- and high molecular organic compounds; development of the scientific basis for the use of domestic high- flotation agents for mineral processing; synthesis and study of films based on water-soluble polymers modified with nanoparticles of noble metals (silver, gold, palladium), rare-earths (samarium, europium).

Beycan Ibrahimoglu – DSc in Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering Department, Ghazi University. Scientific interests: studying of physical and chemical bases kinetics processes of crystallization of substances; plasma physics.

Pokyntelytsia Artem – post-graduate student, Nanophysics Department, Donetsk National University. Scientific interests: thin film coatings, vacuum deposition, structure of thin films, nanomaterials.

Pokyntelytsia Olena – post-graduate student, Physics and Physical Material Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamic and kinetic phase transformations.