Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 11, с. 804 – 810

Фазовые превращения и упругие свойства этанола, метанола и двойных систем CH_3OH:C_2H_5OH при низких температурах и высоких давлениях

Е. Л. Громницкая[1], *И. В. Данилов, В. В. Бражкин*

Институт физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 апреля 2026 г.
После переработки 29 апреля 2026 г.
Принята к публикации 30 апреля 2026 г.

Было исследовано барическое и температурное поведение упругих свойств метанола, этанола и двойных систем CH_3OH:C_2H_5OH с различной массовой концентрацией компонентов (25:75; 50:50; 75:25) в диапазоне 77–293 К при давлениях до 1 ГПа. Проведено сравнение упругих свойств стекол этанола с различной скоростью закалки. Для двойных систем CH_3OH:C_2H_5OH наблюдается монотонный рост значений модуля сдвига G с увеличением доли этанола. Температурные зависимости модуля сдвига смесей 25:75 и 75:25 демонстрируют схожее поведение с основной компонентой смеси, а концентрация 50:50 имеет нехарактерную температурную зависимость, отличную от чистых этанола и метанола.

DOI: 10.7868/S3034576626060073

1. Введение. Метанол и этанол относятся к достаточно простым модельным объектам, на примере которых можно исследовать природу межмолекулярных взаимодействий в системах с водородными связями. Метанол и этанол считаются "классическими" объектами с умеренным по силе водородным взаимодействием (этанол, даже скорее, слабым). Для понимания природы таких систем чрезвычайно полезна информация о влиянии давления и температуры на структуру и физические свойства, определяемые в значительной степени особенностями водородных связей при этих условиях [1].

Сложность фазовой диаграммы этанола (CH_3CH_2OH) является одной из самых интересных особенностей этого материала. В настоящее время установлено [2–9], что при низких температурах этанол является полиморфным, существуя в различных твердых фазах: полностью упорядоченный (моноклинный) кристалл, (bcc) пластический кристалл (PC), который при закалке становится ориентационно-разупорядоченным кристаллом (ODC) со свойствами стекла (иногда его называют "стекловидным кристаллом" или даже ориентационным стеклом), и обычное структурное стекло. Удивительно, что переход переохлажденная жидкость (SCL) → стекло и переход PC → ODC происходят при одной и той же температуре $T_g = 95$–97 К (температура стеклования) [3]. В наших экспериментах мы получали стекла этанола путем быстрого охлаждения жидкости (100 К/мин) и охлаждением 10 К/мин от комнатной температуры (плавление $T_m = 159$ К) до температуры ниже T_g.

Метанол также демонстрирует достаточно сложное поведение в условиях переменных давления и температуры, водородная связь в данном случае играет ключевую структурообразующую роль. Метанол или метиловый спирт CH_3OH выглядит как маленькая, "квазисферическая" молекула и легко кристаллизуется. Поэтому очень трудно получить чистый метанол в виде объемного стекла при стандартных условиях и скоростях охлаждения. При атмосферном давлении с понижением температуры метанол при $T = 175$ К кристаллизуется в высокотемпературную орторомбическую β-фазу, а при дальнейшем понижении при $T = 157$ К происходит твердофазное превращение из β в моноклинную α-фазу [10–16]. Кристаллические структуры α и β модификаций определены в [15, 16].

Двойные системы метанол-этанол изучены в работах [17–20]. В работе [17] сообщается о сложных молекулярных взаимодействиях при низких концентрациях метанола в двойной системе этанола и метанола. Молекулы этанола образуют агрегаты, удерживаемые вместе водородными связями (O–H–O), а также дисперсионными силами. Добавление небольшого количества метанола приводит к разрыву сети водородных связей этанола из-за большей полярности метанола. Это приводит к тому, что молекулы

[1]e-mail: grom@hppi.troitsk.ru

этанола становятся несколько изолированными друг от друга в каркасной сети молекул метанола. При высокой молярной концентрации метанола (38 молярных процентов) увеличиваются как прочность, так и количество водородных связей между этанолом и метанолом. Геометрия молекулярной структуры при высокой концентрации благоприятствует подгонке молекул компонентов друг к другу. Моделирование молекулярной динамики показывает, что плотность водородных связей напрямую зависит от количества присутствующих молекул метанола [17].

Природа межмолекулярных сил и физические свойства спиртов, в том числе и их упругие характеристики, имеют не только фундаментальный интерес, но и необычайно важны для экспериментальной физики высоких давлений, поскольку как чистый метанол, так и смесь метанол-этанол в соотношении 4:1 часто используется как среда, передающая давление и сохраняющая гидростатичность вплоть до $P \sim 10$ ГПа. Упругие свойства метилового и этилового спиртов под давлением ранее были исследованы при комнатной температуре методом бриллюэновского рассеяния в алмазных наковальнях до 6.8 ГПа [21]. Ранее мы исследовали фазовые диаграммы метанола и этанола в температурном диапазоне 200–293 К под давлением до 1 ГПа с помощью измерения скорости только продольных ультразвуковых волн [10]. Также имеются литературные данные по свойствам жидкого метанола до 20 МПа ($T = 233-353$ К) [22, 23], до 100 МПа и $T = 208-298$ К [24]. Одним из преимуществ ультразвукового метода является возможность наблюдать фазовые превращения, сопровождающиеся малыми скачками объема, и контролировать измеряемые параметры практически непрерывно, при этом достаточно точно определяя температуру и давление фазовых переходов.

В настоящей работе проведено ультразвуковое исследование этанола и метанола, а также их двойных систем в широком диапазоне температур (77–293 К) и давлений до 1 ГПа.

2. Экспериментальная методика. Ультразвуковые эксперименты проводились на низкотемпературном пьезометре, типа “поршень-цилиндр”, импульсным ультразвуковым методом с использованием пластин $LiNbO_3$ в качестве пьезоэлектрических датчиков с несущими частотами 5 МГц для поперечных волн и 10 МГц для продольных волн. Для работы использовалась установка “U-Sonic”, в основе которой лежит платформа PXI, разработанная фирмой National Instruments (NI), модернизированная в ИФВД РАН. Длины образцов измерялись с помощью индикаторов часового типа с точностью до 1 мкм, время прохождения ультразвуковых сигналов через образец регистрировалось с точностью 1 нс. Для измерения температуры были использованы 4 медь-константановые термопары, размещенные вблизи образца.

Чистые спирты получались осушением их водных растворов до концентрации 99.5 %. Смеси этанола и метанола с различной массовой концентрацией компонентов (25:75; 50:50; 75:25) выдерживались минимум две недели для гомогенизации, затем заливались в тонкостенные тефлоновые капсулы с медными крышками и помещались в ячейку высокого давления. Охлаждение происходило со скоростью 10 К/мин, после этого были проведены как изотермические, так и изобарические эксперименты.

Во время исследований было проведено два типа экспериментов по определению упругих свойств: изотермическое сжатие вещества при температуре 77 К и изобарические отогревы при давлениях 0.05 и 0.35 ГПа в диапазоне температур 77–293 К. Методика эксперимента подробно изложена в работах [25–28]. В результате были получены барические и температурные зависимости скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн в метаноле и этаноле, а также их двойных систем до давлений 1 ГПа и температур от 77 до 293 К, что позволило рассчитать упругие характеристики исследуемых веществ. Рассмотрим вначале отдельно результаты, полученные для каждого из спиртов.

3. Экспериментальные результаты.

3.1. Этанол и метанол. Как уже указывалось, в области низких температур при 77 К этанол демонстрирует полиморфизм [2–9]. Наш экспериментальный метод позволяет варьировать скорость охлаждения образца, и нам удалось получить стеклообразный этанол из жидкого состояния при быстрых скоростях охлаждения (100 К/мин) и при умеренных скоростях охлаждения (10 К/мин). Полученные из экспериментов под давлением упругие свойства стекол (синие квадраты 100 К/мин, красные круги 10 К/мин) представлены на рис. 1 и демонстрируют существенную разницу в упругих модулях (особенно для модуля B). Модуль сдвига G стекла, полученного охлаждением 10 К/мин, оказался на 14 % выше, чем у стеклообразного этанола, полученного при 100 К/мин. Для модуля объемной упругости B эта разница составляет 22 %. Также отличаются барические производные упругих модулей: для стекла с медленным охлаждением $dB/dP = 5.3$, $dG/dP = 1.8$; а для стекла с быстрым охлаждением $dB/dP = 3.7$, $dG/dP = 1.6$. Барические зависимости упругих модулей до 1 ГПа при 77 К являются монотонными и об-

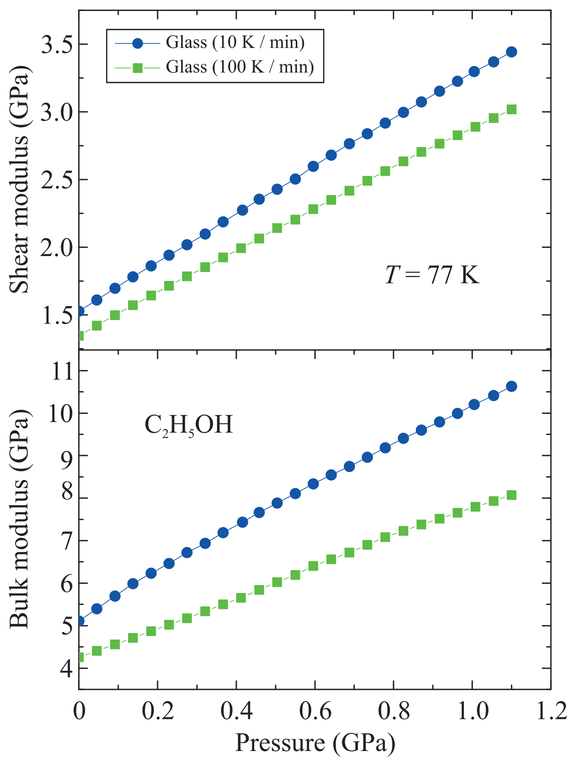

Рис. 1. (Цветной онлайн) Барические зависимости упругих модулей стекол этанола, полученных при быстром (100 К/мин) и умеренном (10 К/мин) охлаждении. На верхней панели экспериментальные зависимости сдвигового модуля, на нижней панели – зависимости модуля объемной упругости

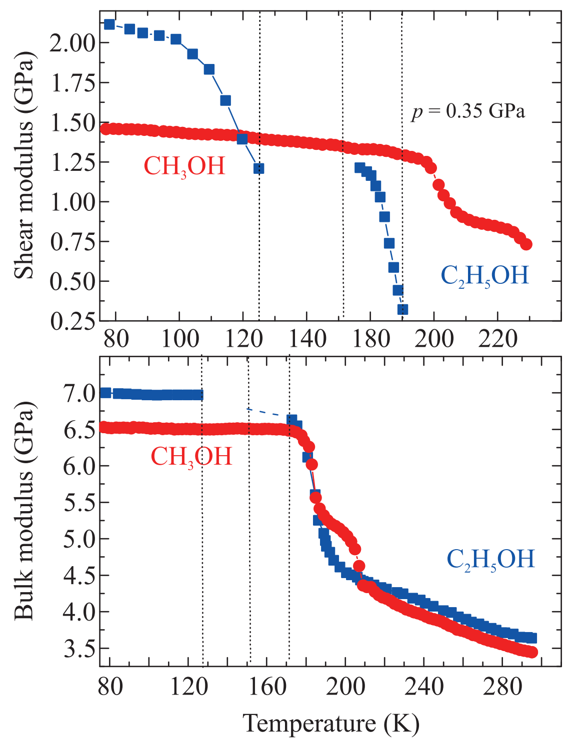

Рис. 2. (Цветной онлайн) Температурные зависимости упругих модулей метанола (красные круги) и этанола (синие квадраты) при изобарическом (0.35 ГПа) отогреве. Пунктирные линии на графике относятся к границам существования фаз этанола: 125–150 К переход из стекла в пластический кристалл; 150–170 К область существования пластического кристалла этанола; 170 К плавление этанола. На верхней панели экспериментальные зависимости сдвигового модуля, на нижней панели – зависимости модуля объемной упругости

ратимыми, фазовые превращения в этом диапазоне давлений при изотермическом сжатии не наблюдаются.

Модули упругости, полученные при отогреве стекла этанола, полученного охлаждением 10 К/мин, от 77 К при 0.35 ГПа представлены на рис. 2. Модуль сдвига этанола (синие квадраты) демонстрирует сильное смягчение (около 40 %) при росте температуры до 125 К. В то же время модуль объемной упругости в этом диапазоне практически не зависит от температуры. В температурном диапазоне 125–150 К наблюдалось сильное поглощение сдвиговой и продольной ультразвуковой волны. Отсутствие сдвигового сигнала привело к тому, что в этом диапазоне мы не смогли измерить модуль сдвига и модуль объемной упругости несмотря на непрерывные измерения скорости продольной ультразвуковой волны, что характерно для жидкого состояния. Условием прохождения поперечных ультразвуковых волн через жидкую среду является выражение $\Omega\tau \gg 1$, где Ω – частота ультразвуковых колебаний, τ – время релаксации жидкости. Использованные в наших экспериментах частоты 5–10 МГц приводят к временам релаксации $\tau > 10^{-5}$ с. Вязкость жидкости определяется формулой $\eta = G\tau$, где G – модуль сдвига. Характерный модуль сдвига для этанола в этом температурном диапазоне 1–1.5 ГПа (рис. 2). Таким образом, условием прохождения ультразвука через исследуемую среду являются значения вязкости $\eta > 10^4$ Па · с. По всей видимости, в этом температурном интервале наблюдается квазижидкостное поведение этанола с эквивалентной вязкостью $\sim 10^4$ Па · с. Мы полагаем, что температурный интервал 125–150 К – это область перехода из стекловидной фазы в пластический кристалл. Температурную область 150–170 К при 0.35 ГПа мы определяем как область существования пластического кристалла PC этанола. При 170 наблюдается плавление пластического кристалла в жидкую фазу, что мы детектировали по резкому падению как скоростей ультразвука, так и плотности. В жидкости сдвиговой сигнал отсутствует, а модуль объемной упругости рассчитывался из экспериментальной зависимости продольной скорости ультразвука и плотности образца.

На этом же рис. 2 нанесены модули упругости метанола, также полученные при отогреве установки в этом же диапазоне температур и давлений. Можно отметить, что модуль сдвига метанола непрерывно измерялся в диапазоне температур 77–200 K, и переход $\alpha-\beta$ регистрировался по аномалиям как сдвиговой, так и продольной волны при 178 K (0.35 ГПа). В отличие от этанола, упругие модули метанола слабо зависят от температуры в α-фазе, в частности, при нагреве 77–178 K модуль сдвига уменьшился лишь на 15 %. При твердофазном переходе $\alpha-\beta$ наблюдалось скачкообразное падение обоих модулей метанола: 27 % – для модуля сдвига и 18 % – для модуля объемной упругости. При 204 K происходило плавление вещества, и в дальнейшем наблюдался лишь сигнал продольной ультразвуковой волны. Имеющиеся в литературе данные о параметрах перехода $\alpha-\beta$ (157 K) и плавления (175 K) получены при охлаждении при атмосферном давлении. Наши эксперименты проводились при 0.35 ГПа в режиме отогрева, с чем связаны разницы в численных значениях переходов.

3.2. Двойные системы этанола и метанола. Этанол и метанол сильно самоассоциируются: они образуют разветвленные сети водородных связей благодаря сходству связи C–OH в обоих [17, 29]. Однако поведение двойной системы этанол-метанол далеко от идеального, поскольку силы как донорной, так и акцепторной водородных связей, по-видимому, не идентичны. Имеется обширная экспериментальная информация о свойствах смесей метанол-этанол, полученная различными методиками: рентгеновской дифракцией [30], диэлектрической спектроскопией [17, 31], бриллюэновским рассеянием [32], вискозиметрией [18, 19], рефрактометрией [29]. Есть также расчеты транспортных свойств методом молекулярной динамики [20]. В литературе имеются данные о скоростях звука в жидких бинарных смесях, но лишь при атмосферном давлении [19, 33]. Однако мы не смогли найти в литературе данные о свойствах двойных систем метанол-этанол при низких температурах и высоких давлениях.

Было проведено исследование смесей этанола и метанола с различной массовой концентрацией компонентов (25:75; 50:50; 75:25) под давлением до 1 ГПа и в режиме естественного отогрева 77–293 K. Вычисленные упругие характеристики двойных систем этанола и метанола из изотермических экспериментов при температуре 77 K до давлений 1 ГПа представлены на рис. 3. Упругие характеристики чистого этанола под давлением указаны на рис. 1 и при отогреве – на рис. 2. Для метанола указаны упругие модули при отогреве на рис. 2 и только на рис. 3 – приведены под давлением. Отметим, что для модуля сдвига наиболее ярко проявляется различие между этанолом и метанолом: увеличение G этанола по сравнению с метанолом достигает 31 %, при этом dG/dP также растет. Для двойных систем наблюдается монотонный рост как абсолютных значений модуля G, так и рост его производной dG/dP с увеличением доли этанола. Модуль объемной упругости демонстрирует меньший эффект ≈ 17 %, а производная по давлению $dB/dP \approx 5$ практически одинакова как для чистых веществ, так и двойных систем.

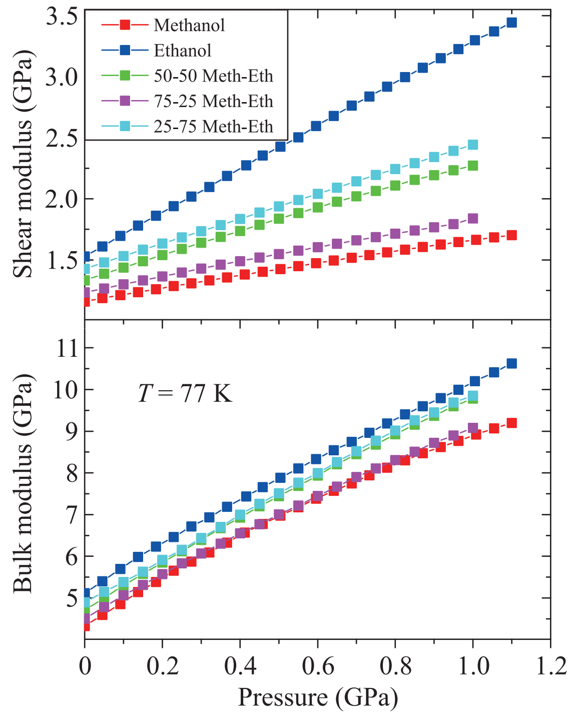

Рис. 3. (Цветной онлайн) Упругие модули двойных систем этанола и метанола, а также чистых спиртов этанола и метанола при изотермическом (77 K) сжатии до давлений 1 ГПа. На верхней панели экспериментальные зависимости сдвигового модуля, на нижней панели – зависимости модуля объемной упругости

Следующим этапом наших исследований было проведение изобарических экспериментов при малых давлениях ($P = 0.05$ ГПа) в режиме естественного отогрева от 77 K до комнатной температуры (рис. 4). Сигнал поперечной ультразвуковой волны нам удалось наблюдать только в твердом состоянии до 120 K, а продольной волны – как в твердом состоянии при низких температурах, так и в жидкости после плавления. Однако в диапазоне 120–175 K наблюдалось сильное поглощение продольных ультразвуковых волн вплоть до полной потери, что хорошо коррелирует с диэлектрическими измерениями [7, 14]. Модуль сдвига G чистого метанола слабо зависит от температуры до 120 K, а модуль сдвига этанола довольно резко уменьшается при повышении температуры. Следует отметить, что представленные на рис. 2 температурные зависимости упругих свойств чистых спиртов получены при давлении 0.35 ГПа, а на рис. 4 – при давлении 0.05 ГПа. Температурные зависимости модуля сдвига двойных систем 25:75 и 75:25 демонстрируют схожее поведение с основной компонентой смеси. Однако концентрация 50:50 имеет нехарактерную температурную зависимость: модуль G практически не меняется с повышением температуры, однако при 120 K наблюдается резкое падение модуля. Модуль объемной упругости при низких температурах монотонно зависит от концентрации веществ, так же, как и при изотермическом сжатии до 1 ГПа. Оказалось, что область максимального поглощения продольных ультразвуковых волн наиболее узкая для концентрации 50:50 (130–145 K), в то время как в чистом этаноле этот диапазон 125–170 K. В чистом метаноле при низких температурах наблюдается переход из моноклинной α-фазы в орторомбическую β-фазу при 160 K, а плавление при 182 K (температуры фазовых переходов выше, чем литературные данные, из-за давления 0.05 ГПа, при котором происходит отогрев). При температурах выше 180 K все двойные системы и чистые вещества находятся в жидком состоянии, а величины модуля B имеют монотонную зависимость от концентрации, но с меньшей разницей, чем при низких температурах.

4. Заключение. В работе исследовалось барическое и температурное поведение упругих свойств метанола и этанола и их двойных систем с различной массовой концентрацией компонентов (25:75; 50:50; 75:25) при твердофазных превращениях и плавлении в диапазоне 77–293 K при высоких давлениях до 1 ГПа. Первоначальной задачей, до изучения смесей, было провести исследование упругих свойств метанола и этанола. Проведено сравнение упругих свойств при 77 K стекол этанола, полученных с разной скоростью закалки. Модуль сдвига G стекла этанола, полученного путем умеренного охлаждения (10 K/мин), оказался на 14 % выше, чем у стеклообразного этанола, полученного при быстром охлаждении (100 K/мин). Для модуля объемной упругости эта разница составляет 22 %. В чистом метаноле при изобарическом отогреве при давлении 0.05 ГПа наблюдается переход из моноклинной α-фазы в орторомбическую β-фазу при 160 K, а плавление – при 182 K. При давлении 0.35 ГПа температуры переходов увеличиваются до 178 и 204 K, соответственно. При изотермическом сжатии для двойных систем метанол-этанол наблюдается монотонный рост как абсолютных значений модуля G, так и рост его производной dG/dP с увеличением доли этанола. Модуль объемной упругости демонстрирует меньший эффект $\approx$ 17 %, а производная по давлению $dB/dP \approx 5$ практически одинакова как для чистых веществ, так и смесей. Температурные зависимости модуля сдвига смесей 25:75 и 75:25 демонстрируют схожее поведение с основной компоненты смеси. Однако концентрация 50:50 имеет нехарактерную температурную зависимость, отличную от чистых этанола и метанола. В диапазоне 120–175 K наблюдается сильное поглощение ультразвуковых волн вплоть до полной потери, что хорошо коррелирует с диэлектрическими измерениями.

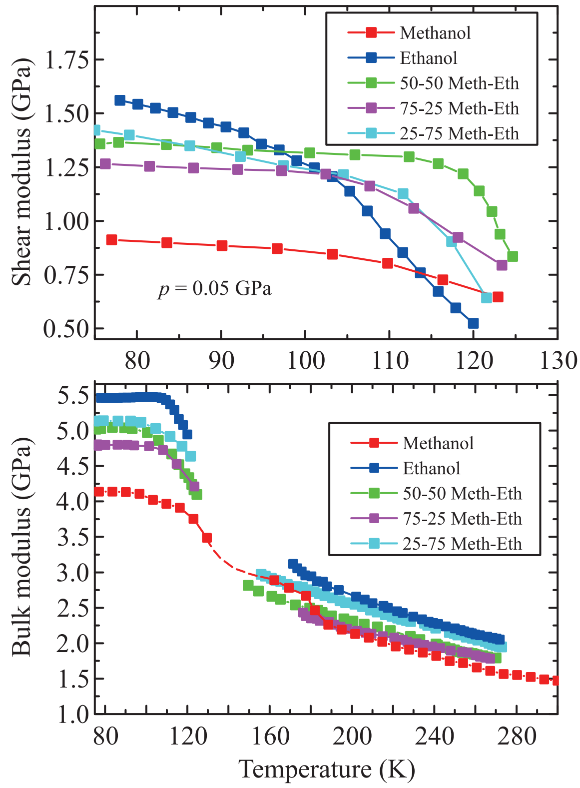

Рис. 4. (Цветной онлайн) Упругие модули двойных систем этанола и метанола, а также чистых спиртов этанола и метанола при изобарическом (0.05 ГПа) отогреве 77–300 K. На верхней панели экспериментальные зависимости сдвигового модуля, на нижней панели – зависимости модуля объемной упругости

Финансирование работы. Данная работа была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) номер 24-12-00037.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. В. В. Бражкин, И. В. Данилов, О. Б. Циок, "Тайны воды и других аномальных жидкостей: "медленный" звук, релаксирующие сжимаемость и теплоемкость", Письма в ЖЭТФ **117**, 840 (2023) [V. V. Brazhkin, I. V. Danilov, and O. B. Tsiok, "Mysteries of Water and Other Anomalous Liquids: "Slow" Sound and Relaxing Compressibility and Heat Capacity (Brief Review)", JETP Lett. **117**, 834 (2023)].
2. M. A. Ramos, M. Hassaine, B. Kabtoul, R. J. Jiménez-Riobóo, I. M. Shmyt'ko, A. I. Krivchikov, I. V. Sharapova, and O. A. Korolyuk, "Low-temperature properties of monoalcohol glasses and crystals", Low Temp. Phys. **39**, 468 (2013).
3. R. J. Jiménez Riobóo and M. A. Ramos, "Brillouin spectroscopy experiments on polymorphic ethanol", Philos. Mag. **87**, 657 (2007).
4. S. Benkhof, A. Kudlik, T. Blochowicz, and E. Rössler, "Two glass transitions in ethanol: a comparative dielectric relaxation study of the supercooled liquid and the plastic crystal", J. Phys.: Condens. Matter **10**, 8155 (1998).
5. B. Kabtoul, R. J. Jiménez Riobóo, and M. A. Ramos, "Thermal and acoustic experiments on polymorphic ethanol", Philos. Mag. **88**, 4197 (2008).
6. J.-H. Ko and S. Kojima, "Brillouin scattering study on glass-forming ethanol", J. Non-Cryst. Solids **307–310**, 154 (2002).
7. J.-H. Ko and S. Kojima, "Comparison of Acoustic Behaviors Between Ethanol and Partially-Deuterated Ethanol", J. Korean Phys. Soc. **56**, 409 (2010).
8. M. V. Kondrin, A. A. Pronin, and V. V. Brazhkin, "Crystallization and vitrification of ethanol at high pressures", J. Chem. Phys. **141**, 194504 (2014).
9. C. Talón, M. A. Ramos, and S. Vieira, "Low-temperature specific heat of amorphous, orientational glass, and crystal phases of ethanol", Phys. Rev. B **66**, 012201 (2002).
10. Е. Л. Громницкая, О. В. Стальгорова, О. Ф. Ягафаров, В. В. Бражкин, А. Г. Ляпин, С. В. Попова, "Исследование фазовой диаграммы метанола ультразвуковым методом", Письма в ЖЭТФ **80**, 697 (2004) [E. L. Gromnitskaya, O. V. Stal'gorova, O. F. Yagafarov, V. V. Brazhkin, G. Lyapin, and S. V. Popova "Ultrasonic Study of the Phase Diagram of Methanol", JETP Lett. **80**, 597 (2004)].
11. M. V. Kondrin, A. A. Pronin, Y. B. Lebed, and V. V. Brazhkin, "Phase transformations in methanol at high pressure measured by dielectric spectroscopy technique", J. Chem. Phys. **139**, 084510 (2013).
12. C. Červinka and G. J. O. Beran, "*Ab initio* prediction of the polymorph phase diagram for crystalline methanol", Chem. Sci. **9**, 4622 (2018).
13. A. Wurfinger and R. Landau, "Phase behaviour of solid methanol up to 3 kbar", J. Phys. Chem. Solids **38**, 811 (1977).
14. B. H. Torrie, O. S. Binbrek, M. Strauss, and I. P. Swainsonz, "Phase Transitions in Solid Methanol", J. Solid State Chem. **166**, 415 (2002).
15. Ó. Gálvez, B. Maté, B. Martín-Llorente, V. J. Herrero, and R. Escribano, "Phases of Solid Methanol", J. Phys. Chem. A **113**, 3321 (2009).
16. T. J. Lin, C. R. Hsing, C. M. Wei, and J. L. Kuo, "Structure Prediction of the Solid Forms of Methanol: An Ab Initio Random Structure Searching Approach", Phys. Chem. Chem. Phys. **18**, 2736 (2016).
17. K. Nilavarasi, T. R. Kartha, and V. Madhurima, "Evidence of anomalous behavior of intermolecular interactions at low concentration of methanol in ethanol-methanol binary system", Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy **188**, 301 (2017).
18. A. P. Maharolkar, P. W. Khirade, and A. G. Murugkar, "Study of intermolecular interactions in binary mixtures of ethanol in methanol", AIP Conf. Proc. **1728**, 020038 (2016).
19. E. J. Gonzalez, L. Alonso, and Á. Domínguez, "Physical Properties of Binary Mixtures of the Ionic Liquid 1-Methyl-3-octylimidazolium Chloride with Methanol, Ethanol, and 1-Propanol at T (298.15, 313.15, and 328.15) K and at $P = 0.1$ MPa", J. Chem. Eng. Data **51**, 1446 (2006).
20. G. Guevara-Carrion, C. Nieto-Draghi, J. Vrabec, and H. Hasse, "Prediction of transport properties by molecular simulation: methanol and ethanol and their mixture", Phys. Chem. B **112**, 16664 (2008).
21. J. M. Brown, L. J. Slutsky, K. A. Nelson, and L.-T. Cheng, "Velocity of Sound and Equations of State for Methanol and Ethanol in a Diamond-Anvil Cell Science", Science **241**, 65 (1988).
22. C. W. Scholz and R. Span, "Speeds of Sound in Methanol at Temperatures from 233.33 to 353.21 K at Pressures up to 20 MPa", International Journal of Thermophysics **42**, 18 (2021).
23. M. A. Javed, E. Baumhogger, and J. Vrabec, "Thermodynamic Speed of Sound Data for Liquid and Supercritical Alcohols", J. Chem. Eng. Data **64**, 1035 (2019).
24. R. S. Chauhan, P. Singh, and C. P. Singh, "Isothermal compressibility and bulk modulus for methanol under the effect of pressure and temperatures", Chin. J. Phys. **63**, 45 (2020).
25. E. L. Gromnitskaya, I. V. Danilov, A. G. Lyapin, and V. V. Brazhkin, "Elastic properties of liquid and glassy propane- based alcohols under high pressure: the increasing role of hydrogen bonds in a homologous family", Phys. Chem. Chem. Phys. **21**, 2665 (2019).

26. I. V. Danilov, E. L. Gromnitskaya, and V. V. Brazhkin, "Ultrasonic study of the elastic properties of propylene glycol oligomers in the glassy state and during the glass–liquid transition", Phys. Chem. Liq. **60**, 645 (2022).
27. I. Danilov, E. Gromnitskaya, and V. Brazhkin, "Vivid Manifestation of Nonergodicity in Glassy Propylene Carbonate at High Pressures", J. Phys. Chem. B **120**, 7593 (2016).
28. Е. Л. Громницкая, А. Г. Ляпин, О. В. Стальгорова, И. В. Данилов, В. В. Бражкин, "Ультразвуковое исследование твердофазной аморфизации и полиаморфизма в твердом растворе H_2O–D_2O (1:1)", Письма в ЖЭТФ **96**, 879 (2012) [E. L. Gromnitskaya, A. G. Lyapin, O. V. Stalgorova, I. V. Danilov, and V. V. Brazhkin, "Ultrasonic Study of Solid Phase Amorphization and Polyamorphism in an H_2O–D_2O (1:1) Solid Solution", JETP Lett. **96**, 789 (2012)].
29. X. Wu, Y. Chen, and T. Yamaguchi, "Hydrogen bonding in methanol studied by infrared spectroscopy", J. Mol. Spectrosc. **246**, 187 (2007).
30. A. H. Narten and A. Habenschuss, "Hydrogen bonding in liquid methanol and ethanol determined by x-ray diffraction", J. Phys. Chem. **80**, 3387 (1984).
31. B. G. Lone, P. B. Undre, S. S. Patil, P. W. Khirade, and S. C. Mehrotra, "Dielectric study of methanol–ethanol mixtures using TDR method", J. Mol. Liq. **141**, 47 (2008).
32. J. Bak and R. Sooryakumar, "Pressure dependence of the refractive index and of the sound velocity of methanol-ethanol solution: A Brillouin scattering study", High Pressure Research **11**, 329 (1994).
33. M. Iglesias, B. Orge , M. Domnguez, and J. Tojo, "Mixing Properties of the Binary Mixtures of Acetone, Methanol, Ethanol, and 2-Butanone at 298.15 K", Phys. Chem. Liq. **37**, 9 (1998).