

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**СЕМЕНОВ ДЕНИС ИВАНОВИЧ**

**СУЮҚЛИКЛАРДА ТАРТИБ ПАРАМЕТРИНИНГ  
ФЛУКТУАЦИЯЛАР ДИНАМИКАСИ ҲАМДА УЛАРНИНГ  
ОПТИК ВА АКУСТИК ХОДИСАЛАРДА НАМОЁН БЎЛИШИ**

**01.04.05 – Оптика (физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016**

**Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси**  
**Оглавление автореферата докторской диссертации**  
**Content of the abstract of doctoral dissertation**

Семенов Денис Иванович Сууюкликларда тартиб параметрининг флукуациялар динамикаси ҳамда уларнинг оптик ва акустик ходисаларда намоён бўлиши .....	3
Семенов Денис Иванович Динамика флукуаций параметра порядка в жидкостях и их проявление в оптических и акустических явлениях .....	25
Semenov Denis Ivanovich Dynamics of order parameter fluctuations in liquids and their manifestation in optical and acoustical phenomena .....	49
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works .....	70

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**СЕМЕНОВ ДЕНИС ИВАНОВИЧ**

**СУЮҚЛИКЛАРДА ТАРТИБ ПАРАМЕТРИНИНГ  
ФЛУКТУАЦИЯЛАР ДИНАМИКАСИ ҲАМДА УЛАРНИНГ  
ОПТИК ВА АКУСТИК ҲОДИСАЛАРДА НАМОЁН БЎЛИШИ**

**01.04.05 – Оптика (физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016**

**Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида 28.04.2016/В2016.2.FM85 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz)) манзилига ва “ZiyoNet” ахборот таълим тармоғида ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:** **Сабилов Леонард Мухаммеджанович,**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Коххаров Абдумуталиб Мамажонович,**  
физика-математика фанлари доктори  
**Азаматов Зокиржон Тохирович,**  
физика-математика фанлари доктори  
**Астанов Салих Хусенович,**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:** **Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи 16.07.2013.FM/Т.12.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2016 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, email: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

Докторлик диссертацияси билан Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Тел./факс: (99871) 235-30-41).

Диссертация автореферати 2016 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.

(2016 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**С.Л. Лутпуллаев,**  
фан доктори илмий даражасини берувчи  
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

**А.В. Каримов,**  
фан доктори илмий даражасини берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д, профессор

**И.Г. Агабаев,**  
фан доктори илмий даражасини берувчи  
илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар  
раиси, ф.-м.ф.д., профессор

## КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти.** Бугунги кунда суюқликларда кооператив ҳодисалар ва фазавий ўтишлар физикаси, кучли флукуацияланувчи муҳитлар оптикаси ривожланиши билан бир компонентли суюқлик ва эритмаларда махсус ҳамда критик нуқталар атрофида содир бўладиган физик ҳодисаларни тадқиқ қилиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Критик нуқта атрофида катта масштабли корреляциялар, структуравий тузилмалар ҳосил бўлиши, бузилиши наноўлчамли фазовий ва вақт масштабларида намоён бўлади. Мазкур тадқиқотлар фаза ўтишларда коллектив (тартиб параметри) ва ички эркинлик даражаларининг ўзаро таъсири хусусиятларини аниқлашга бағишланган. Ушбу муаммо ечими ҳозирги замон биофизика, биокимё ва биотехнология соҳасида истиқболли нанотехнологик йўналишларни ҳаётга жорий қилишда муҳим аҳамият касб этади.

Суюқлик ҳолатининг критик ва махсус нуқталари атрофида ёруғликнинг Релей сочилиш спектрида нозик структура компонентларининг частотавий силжиши, спектрал кенглиги, интеграл интесивлиги ўзгариши динамикасини тадқиқ қилиш наномасштаб ўлчамларда суюқликлар коррелятив хусусиятларининг намоён бўлиши, ёруғликнинг молекуляр сочилиш спектрини тадқиқ қилиш, моддалар структураси ва кинетик хоссалари тўғрисида муҳим илмий маълумотларга эга бўлиш имконини берди. Чунки сочилган ёруғликнинг спектрал таркиби текширилаётган муҳит термодинамик катталикларининг флукуацияси динамикаси билан аниқланади. Лекин бундай тадқиқотларни амалга ошириш мураккаб экспериментал масала ҳисобланади. Бу жараёнда критик нуқта яқинида спектрнинг нозик структурасини қайд қилиш мураккаблашади, чунки муҳитда флукуация ортади, бу эса уйғонувчан ёруғлик частотасида сочилиш интенсивлигининг кучли ошишига олиб келади. Шу сабабли суюқликнинг критик нуқтаси атрофида сочилган ёруғлик нозик структураси спектрини тадқиқ қилиш жуда кам ўрганилган.

Суюқлик ҳолати критик ва махсус нуқталари атрофида ўртача молекуляр тартиби масштабида структура ҳосил қилиш жараёни ва флукуация динамикаси қонуниятларини, ҳамда суюқлик турғунмас ҳолати ва термодинамик турғун ҳолатини инвазив (контактсиз) таҳлил қилиш спектроскопик усулини ривожлантириш диссертация мавзусининг заруриятини кўрсатади. Бу усул асосида кучли флукуацияланувчи муҳитларда ёруғликнинг молекуляр сочилиш, суюқ ҳолат назариялари муамоларини ечишда муҳим илмий амалий аҳамият касб этиб ва керакли хусусиятларга эга материалларни олиш имконини беради.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривож-лантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда

белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг ФП «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» асосий устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Диссертациянинг мавзуси бўйича халқаро илмий-тадқиқотлар шарҳи.** Суяқлик критик ҳолати, сочилган ёруғлик интеграл характеристикаларида суяқлик ҳолати критик ва махсус нуқталари атрофида юқори частотали товуш тарқалиши характерида катта масштабда корреляциялар намоён бўлиши жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан University of Maryland (АҚШ), University of Silesia (Польша), Institute of Industrial Science, University of Tokyo (Япония), Research Institute for Solid State Physics and Optics (Венгрия), Россия фанлар академияси Физика институти ва Санкт-Петербург давлат университети (Россия), Киев ва Одесса миллий университетлари (Украина) ҳамда Самарқанд давлат университетида (Ўзбекистон) тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Жаҳон миқёсида суяқлик термодинамик турғунмас ҳолатида махсус ва критик нуқталари яқинида сочилган ёруғлик спектрал таркибида намоён бўладиган тартиб параметрлари флуктуацияси динамикасининг физик механизмларини аниқлашда қатор, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: критик нуқта яқинида ва бошқа иккинчи тур фазавий ўтишларда суяқлик табиатининг умумий хусусиятлари экспериментал аниқланган (University of Maryland, АҚШ); критик жараёнларда флуктуацияларнинг ўзаро таъсирда сезиларли роли борлиги аниқланган (Россия фанлар академияси Физика институти, Россия); системаларнинг критик нуқталар яқинида физик хусусиятларга ноаналитик (сингуляр) ўзгариши экспериментал аниқланган (Silesia университети, Польша); критик ҳодисалар универсаллигини кузатиш шароитлари топилиб критик ҳодисаларнинг изоморфизми фарази таклиф қилинган (Токуо университети, Япония; Maryland университети, АҚШ).

Бугунги кунда суяқлик ҳолати махсус нуқтаси ва иккиланган критик нуқтаси хусусиятлари тадқиқи бўйича бир қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: махсус нуқтали ноэлектролитлар сув эритмаларида ёруғлик сочилиши спектри нозик структурасини тадқиқ қилиш, нозик структура компонентлари спектрал кенглиги, эритма махсус нуқтаси яқинида юқори частотали товуш тезлиги дисперсияси характерини аниқлаш, дисперсиянинг релаксацион ва норелаксацион механизмларини ишлаб чиқиш бўйича назарий ва экспериментал натижалар олинган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Суяқликлардаги критик ҳодисалар ва фазавий ўтишларини экспериментал ўрганиш ҳозирги вақтда долзарб физик масалаларнинг кенг соҳасини ташкил этади. Суяқлик критик

соҳасидаги ёруғлик сочилиши назарияси Л.С. Орнштейн ва Ф. Цернике томонидан яратилган эди. Иккинчи тур фазавий ўтишларнинг умумий ҳолати В.Л. Гинзбург ва унинг шогирдлари томонидан Л.Д. Ландаунинг фазавий ўтишлар назарияси асосида яратилган. Қатламланувчи эритмаларда критик ҳодисалар ва фазавий ўтишлар содир бўладиган системаларнинг умумий хусусиятларини намоён этади. Турли муҳитлардаги иккинчи тур фазавий ўтишлар манзарасида кўпгина бир хиллик (критик ҳодисалар изоморфизми) мавжуд. Шу сабабли қатламланишнинг критик нуқтаси яқинида ёруғлик сочилиши спектрини экспериментал тадқиқ қилиш умумий характерга эга бўлган маълумотларни олишга имкон беради. Олинган маълумотлар турли табиатга эга фазавий ўтишлардаги критик ҳодисаларга татбиқ қилиш ва фазавий ўтишларнинг микроскопик назариясини яратиш учун зарур.

Россия Фанлар академиянинг мухбир аъзоси И.Л. Фабелинский раҳбарлигида ёпиқ соҳали қатламланувчи эритмаларда ёруғликнинг молекуляр сочилик спектри экспериментал тадқиқи кенг кўламда ўтказилган. Бу тадқиқотларда мавжуд назариялар билан изоҳлаш мумкин бўлмаган янги ҳодисалар, яъни қатламланишнинг юқори ва пастки критик нуқталари температурасида яқинида гипертөвушнинг кучли ютилиши (бу М. Фиксман ва К. Кавасакиларнинг ўзаро таъсирланувчи модалар назарияси ҳамда Л. Каданов ва Ж. Свифтларнинг динамик скейлинг назариясига мос келмайди), пастки қатланиш критик нуқтасида төвуш тезлигининг катта дисперсияси ва унинг температурага кучли боғлиқлиги (бу натижаларни М.А. Леонтовичнинг релаксацион назарияси нуқтаи назаридан изоҳлаш мумкин эмас) экспериментал аниқланди.

Ўзбекистонлик олимлар, жумладан, академиклар П.К. Ҳабибуллаев, А.К. Отахўжаев, проф. Ш. Отажонов, проф. Ф.Х. Тухватуллин, проф. Л.М. Сабиоровлар томонидан эритмаларнинг оптик ва акустик характеристикалари тадқиқ қилинган. Тадқиқот натижалар асосида молекуляр жиҳатдан бинар эритмаларда молекулалараро ўзаро таъсирланиш ва релаксация вақтининг турли жараёнлардаги характеристикаси аниқланган. Самарқанд давлат университетиде проф. Л.М. Сабиоров раҳбарлигида суюқликларнинг махсус ва критик нуқталари яқинида флуктуацион ва структуравий ҳодисалар экспериментал тадқиқотлари ўтказилмоқда. Бу тадқиқотларда ёруғликнинг изотроп ва анизотроп сочилишини ўрганишда спектроскопия усуллари қўланилмоқда. Тадқиқотлар натижасида тушунтириш талаб этиладиган бир қатор янги физик ҳодисалар аниқланди. Булар ичида: махсус ва критик нуқтали эритмаларда спектр нозик структураси компонентларининг ортиқча спектрал кенгайиши; эритма қатламланиш критик нуқтаси яқинида анизотроп сочилик спектрининг торайиши; махсус нуқтали эритмаларда юқори частотали төвуш тезлигининг аномал частотавий боғлиқлиги (дисперсия). Критик суюқликларда И.Л. Фабелинский ва Л.М. Сабиоров раҳбарлигида олинган экспериментал натижалар ёруғлик молекуляр сочиликнинг янги назариялари вужудга келишига олиб келди. Суюқликларда критик ва нокритик флуктуациялари ўзаро таъсир механизмлари И.А. Чабаннинг назарий ишларида таклиф

этилган эди. И.Л. Фабелинский ва Л.М. Сабиров илмий мактаблари интенсив экспериментал тадқиқотларининг асосий йўналиши суюқликлардаги фазавий ўтишларда ёруғликнинг молекуляр сочилиш спектрида намоён бўладиган турли флуктуацияларнинг ўзаро таъсир механизмларини экспериментал асослаш бўлиб келмоқда.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Самарқанд давлат университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг Ф2–2.1.45-сон «Структуравий ва фазавий ўтишлар яқинида тартибланиш параметрлари флуктуацияси ва термодинамик катталиклар динамикасини суюқ кристалларда ва эритмаларда акустооптик, мажбурий ва спонтан ёруғлик сочилишининг лазер спектроскопияси усулида тадқиқ этиш» (2003–2007), ОТ–Ф2–004-сон «Эритмалар ва суюқ кристаллар критик нуқталарида флуктуациялар ўзаро таъсирлари ва уларнинг оптик ва акустик ҳодисаларда намоён бўлиши» (2007–2011) мавзусидаги лойихалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** суюқлик термодинамик турғунмас ҳолатида махсус ва критик нуқталари яқинида сочилган ёруғлик спектрал таркибида намоён бўладиган тартиб параметрлари флуктуацияси динамикасининг физик механизмларини аниқлашдан иборат.

#### **Тадқиқот вазифалари:**

махсус нуқтали ноэлектролитлар сув эритмаларида ёруғлик сочилиши спектри нозик структурасининг концентрация, температура ва сочилиш геометриясига боғлиқлигини аниқлаш. Махсус нуқталар яқинида нозик структура компонентлари спектрал кенглиги ва частотавий силжиш ўзгариши қонуниятларини аниқлаш;

ноэлектролитларнинг сувли эритмаларида «температура–концентрация» координаталарида структуравий мувозанат ҳолатларининг мавжудлик чегараларини топиш. Эритмадаги ноэлектролитлар концентрацияси ва температураси ўзгарганда турли структуравий ҳолатларнинг ўтишини ифодалаш учун параметрларни аниқлаш;

эритма махсус нуқтаси яқинида юқори частотали товуш тезлиги дисперсияси характерини, дисперсиянинг релаксацион ва норелаксацион механизмларини ўрганиш;

ёруғлик сочилиши спектри нозик структурасига асосан эритма махсус нуқтасига яқинлашганда гипертонув ютилиш механизмларини аниқлаш;

эритма махсус нуқтаси яқинида тартиб параметрлари флуктуациялари критик динамикаси қонуниятларини ўрганиш;

Ландау – де Жен ўрта майдон яқинлашиш назариясини «изотроп суюқлик – суюқ кристалл» фазавий ўтиш температураси яқинида тартиб параметри флуктуацияси динамикасини изохлаш учун қўлланишини аниқлаш;

суюқликларда фазавий ўтишларда турли тартиб параметрлари билан изоҳланувчи флуктуациялар динамикаси универсаллик характерини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида сувли эритма термодинамик турғунмас ҳолат махсус нуқтаси ва суяқ кристаллда фазавий ўтишнинг критик нуқтаси олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** суяқликнинг критик ва махсус нуқталари яқинида флуктуацион ва структура ҳосил қилиш жараёнлари динамикаси ҳамда уларнинг сочилган лазер нурланиши спектрал таркибида намоён бўлишидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертацияда ёруғликнинг изотроп ва анизотроп сочилиши лазер спектроскопияси, шунингдек, ультраакустик фононларда лазер нурланиши дифракцияси ходисасига асосланган акустооптик спектроскопия усуллари қўлланилган. Уйғотувчи нурланиш манбаи сифатида частота бўйича стабиллаштирилган He-Ne лазери (630 нм) қўлланилди. Тадқиқотни ўтказишда юқори ажрата олиш қобилиятга эга спектрал асбоблар – юқори контрастли нурни икки қарра ўтказувчи ясси Фабри–Перо интерферометри ва сферик интерферометрлардан фойдаланилган. Натижада текширилаётган объектларнинг спектрал характеристикаларини ўлчашда юқори аниқликка эришилади.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

эритма махсус нуқтаси яқинида юқори частотали товуш тезлиги дисперсияси механизмига фазавий ўтиши экспериментал исботланган ҳамда махсус нуқтадан паст температураларда эритманинг микрогетероген тузилиши ва эритмада структуравий биржинслимаслик корреляция радиуси (~10 нм) аниқланган;

тартиб параметри флуктуацияларида гипертонушнинг нокогерент сочилиш жараёни спектри нозик структурасида намоён бўлиши экспериментал аниқланган. Тартиб параметри флуктуацияси динамикаси иккинчи тур фазавий ўтишлар Ландау назарияси билан ифодаланиши кўрсатилган. Эритманинг махсус нуқта температураси яқинида нозик структура компонентлари ортиқча спектрал кенгайиши механизми асосланган;

эритма махсус нуқтадан паст температурада «суяқлик–суяқлик» структуравий типдаги фазавий ўтиш аниқланиб структуравий фазавий ўтишда тартиб параметри флуктуацияси динамикасини ифодалашда Ландау назариясини қўллаш мумкинлиги асосланган;

«изотроп суяқлик – суяқ кристалл» фазавий ўтиш температураси яқинида ёруғлик анизотроп сочилиш спектри тортиши физик механизмлари аниқланган ҳамда спектр кенглиги ўзгариш динамикаси ва тартиб параметри флуктуацияси релаксация вақтини маълум температуравий ораликда Ландау – де Жен ўрта майдон яқинлашиш назарияси билан ифодалаш мумкинлиги тажрибада исботланган;

суяқ кристалл изотроп фазасида критик ходисалар динамикасини изохлашда тартиб параметри флуктуацияси корреляция радиуси Ландау – де Жен назариясининг қўлланиш чегараси, фазовий ўтиш температураси яқинида изотроп фаза динамик хусусияти табиати косовер характерга (ўрта майдонда флуктуационга) эга эканлиги тасдиқланган;

«изотроп суюқлик – суюқ кристалл» фазавий ўтишда, «суюқлик – суюқлик» структуравий фазавий ўтишда ва эритма махсус нуқтаси атрофида тартиб параметри флуктуацияси динамикаси универсаллиги тажрибалар асосида аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

«температура–концентрация» координаталарида ноэлектролитларнинг сувли эритмаларининг структуравий турғун ҳолатлари диаграммаси олинган; суюқликда юқори частотали товуш тезлиги манфий дисперсия ходисаси экспериментал исботланган;

эритма махсус нуқтаси яқинида «суюқлик–суюқлик» структуравий типдаги фазавий ўтиши аниқланган;

суюқликда уч турли типдаги фазавий ўтишлар тартиб параметрлари флуктуациялари динамикасини изохлаш учун умумлашган қабул қилувчанликнинг критик индекслари аниқланган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги** умум қабул қилинган илмий усулларнинг қўлланилиши, экспериментал тадқиқотларнинг текширилган усуллари, шунингдек, эксперимент натижаларининг юқори даражада қайта такрорланувчанлиги билан тасдиқланади. Экспириментал натижалар ва улар асосидаги хулосалар текшириляётган муаммо масаласида Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбург, П. де Жен, М.А. Леонтович, В.В. Владимирский, И.А. Чабанларнинг назарий ишларида фараз қилинган ғояларни тасдиқлайди.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, параметрларнинг флуктуацияси нолокал релаксацияли суюқликлар назариясига муҳим ҳисса қўшади. Нолокал релаксация турли табиатли флуктуациялар ўзаро таъсири ҳамда суюқликда структура мавжудлиги ва ўзгариши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, наноўлчамли фазо–вақт масштабли суюқ системалар коррелятив характеристикаларини контактсиз диагностика қилишда сочилган лазер нурланиши нозик структураси спектри қўлланилиши экспериментал асосланган. Суюқликларда аниқланган катта масштабли корреляциялар намоён бўлиши қонуниятлари суюқ ҳолат назарияси ва керакли хусусиятга эга материалларни олишда долзарб илмий-амалий изланишлар ривожланишига салмоқли ҳисса қўшади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Диссертацияда водород боғланиш тўрига эга бўлган эритмаларнинг структуравий-мувозанат ҳолати ва эритмаларда водород боғланиш тўри мавжуд бўлиш чегарасини аниқлаш бўйича ишлаб чиқилган таклифлар асосида:

водород боғланиш тўрига эга бўлган эритмаларнинг аниқланган структуравий-мувозанат ҳолатлари ва сочилган нурланишда топилган спектрал чизиқнинг нозик структурали спектр чизиқлари параметрлари 08–02–90252–Узб\_а «Суюқлик–газ, суюқлик–суюқлик, суюқлик–қаттиқ жисм чегарасида фазавий ҳолатлар оптикаси» грантида кварц глобуляр кристаллар спектри характеристикаларининг таҳлил қилишда ишлатилган. Илмий натижанинг қўлланиши қисқа соҳали ношаффоф оптик филтрларининг нурга чидамлилигини ошириш имконини берди (Россия фанлар академияси

Умумий физика институти Тўлқин тадқиқотлари илмий марказининг 2015 йил 8 июндаги маълумотномаси);.

эритмаларда тўрсимон водород боғланишининг мавжудлик чегараларини аниқлаш методикаси 0108U007555 «Водород боғланишнинг сув ва биоэритмалар хоссалари шаклланишида аҳамияти. Туз ва протеинлар таъсирида тўрсимон водород боғланишнинг турли хоссаларини ўзгариши» грантида махсус нуқтали эритмаларда кластерланиш жараёнларини назарий таҳлил қилишда ишлатилган. Илмий натижанинг қўлланиши сувли эритмаларда фазо-вақт наноўлчамли масштабларида барқарор структуралар олиш муаммосини ечиш имконини берган. (Украина миллий университетининг 2016 йил 16 февралдаги маълумотномаси).

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация натижалари қуйидаги халқаро ва республика миқёсидаги илмий анжуман ва симпозиумларда: 4<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2005, Cairo, Egypt); XVI Conference on Liquid Crystals (2005, Stare Jablonki, Poland); 16<sup>th</sup> Symposium on Thermophysical Properties (2006, Boulder, USA); «Молекуляр спектроскопияси» III Халқаро анжумани (2006, Самарқанд); International Conference on Bio-Nanotechnology (2006, Al Ain, UAE); «Замонавий физиканинг оптик усуллари» Республика анжумани (2008, Тошкент); «Замонавий физика ва унинг истиқболлари» Республика анжумани (2009, Тошкент); «Физиканинг замонавий муаммолари ва физика таълими» Республика анжумани (2009, Самарқанд); «Фан ва техникада қайтмас жараёнлар» VII Бутунроссия анжумани (2013, Москва); «Конденсирланган мухитлар спектроскопиясининг долзарб муаммолари» IV Халқаро анжумани (2013, Самарқанд); «Оптика ва Фотоника – 2013» II Халқаро анжумани (2013, Самарқанд); «Физикавий электроника» VI Халқаро анжумани (2013, Тошкент); 7<sup>th</sup> International Conference on Laser Probing (2015, East Lansing, USA) шунингдек, СамДУ физика факультети семинарда (04.02.2016), Физика техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва СамДУ ҳузуридаги 16.07.2013.FM/T.12.01 рақамли илмий кенгашининг илмий семинарида (30.03.2016) апробациядан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 44 та илмий иш чоп этилган, жумладан, 20 та илмий мақола, шундан 15 та нуфузли халқаро ва 5 та республика журналларда ҳамда 24 та тезис халқаро ва республика конференциялар тўпламларида нашр этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 200 саҳифали матн, 62 та расм ва 8 та жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

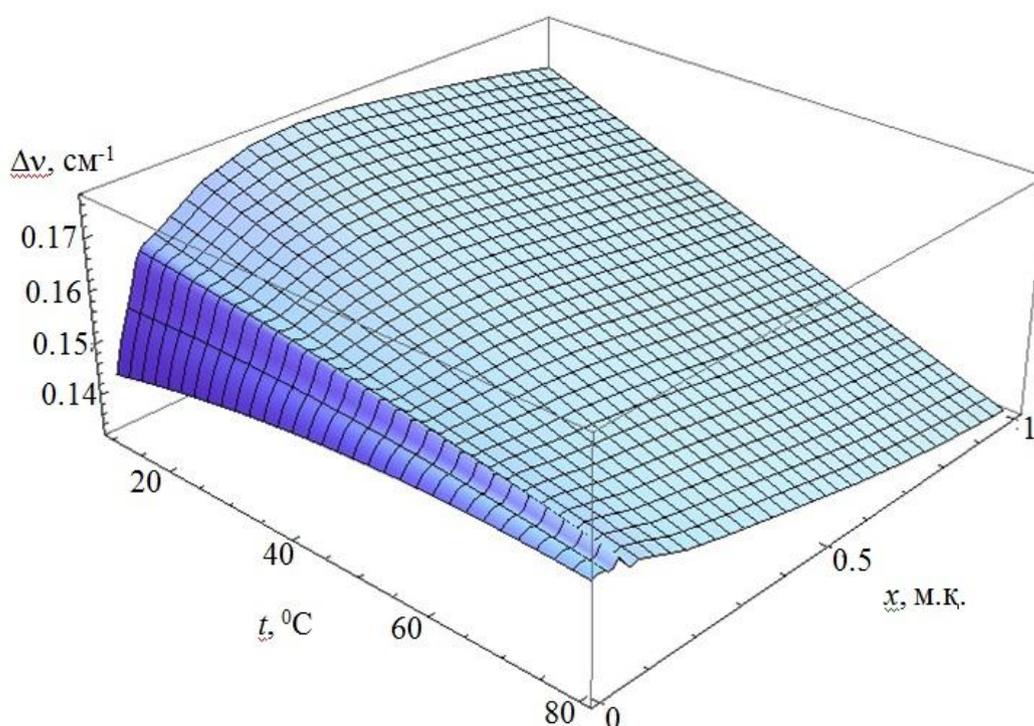
**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг биринчи боби **«Ёруғликнинг молекуляр сочилиш спектрлари ва уларнинг суюқлик ҳолати критик ва махсус нуқтаси тадқиқотида қўлланилиши»** деб номланиб, ушбу бобда мавжуд адабиётлар шарҳи келтирилган. Ёруғлик молекуляр сочилиш спектрининг назарий ва экспериментал тадқиқот натижалари ва суюқ ҳолати критик ҳамда махсус нуқталарини ўрганишга бағишланган. Суюқлик критик ҳолати соҳасида молекуляр сочилиш спектрининг ўзгариши ва бу соҳада гипер акустик параметрларни ўлчашда Мандельштам–Бриллюэн сочилиш спектрини татбиқ қилиш масалалари кўриб чиқилган. Ноэлектролитларнинг сувдаги эритмасида молекуляр флукутация ва ўзини тартиблаш натижасида сочилган ёруғлик интенсивлиги ва спектрал таркиби масалаларига ҳамда «суюқлик–суюқлик» турдаги фазавий ўтишларни аниқлаш ва ўрганишга бағишланган адабиётлар таҳлили кетирилган.

Диссертациянинг иккинчи боби **«Критик ва махсус нуқта яқинида сочилган ёруғлик спектрал тартибини ўрганишнинг экспериментал усули»** деб номланиб, ушбу бобда диссертацияда қўйилган масалага мос равишда ёруғликнинг молекуляр сочилиш спектрини тадқиқ қилиш ва регистрация қилиш усуллари ёритилган. Маълумки, концентрация флукутацияси кучли бўлган эритмаларда ёруғликнинг Мандельштам–Бриллюэн сочилиш спектрини тадқиқ қилишда баъзи қийинчиликлар мавжуд. Шу сабабли бу соҳадаги тадқиқотлар жуда кам. Тартиб параметри флукутацияси кучли суюқликларда Рэлей триплетининг марказий компоненти интенсивлиги Мандельштам–Бриллюэн компоненти интенсивлигидан 3–4 тартибга катта. Биз ўтказган тажрибаларда фазовий ва структуравий ўтиш температураси яқинида Мандельштам–Бриллюэн компонентини кузатиш икки ўтишли Фабри–Перо интерферометрини қўллаш натижасида амалга оширилди, бу қурилмада интерференцион манзара сезгирлиги тахминан 40 ва контрастлиги  $\sim 4 \times 10^5$  га тенг.

Ишда қўлланилган қурилмалар тавсифи, Мандельштам–Бриллюэн компонентлари ва Рэлей қаноти чизиғи спектрида қурилма берадиган хатоликларни ҳисоблаш усули келтирилган. Тадқиқ қилинаётган суюқликлардан оптик тоза намуна тайёрлаш усули ва техникаси баён қилинган.

Диссертациянинг учинчи боби «Махсус нуқтали сувли эритмаларда температурага, концентрация ва сочилиш бурчагига боғлиқ нозик структура спектрлари» деб номланиб, ушбу бобда 4 метилпиридиннинг (4 МП) сувдаги эритмаларида Релей чизиғи нозик структураси спектрини экспериментал тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Бу система махсус нуқтасининг концентрацияси  $x=0,06$  моль қисм (м.қ.) ва температураси  $t \approx 70^\circ$  С га мос келади. 12 та система ўрганилди: 11 тасининг концентрацияси 0,005 дан 0,8 м.қ. гача ўзгарган ва тоза 4 МП ( $x=1$ ). Сочилган ёруғлик спектри  $10-80^\circ$  С температура оралиғида ва сочилиш бурчаги  $90$  ва  $135^\circ$  бўлганда қайд этилган. Умуман, 1800 дан ортиқ спектрлар олинди. Бу эса олиниши мумкин бўлган температура ва концентрация соҳасида Мандельштам–Бриллюэн компонентлари частотавий силжиши  $\Delta\nu$  катталиги ўзгаришини кузатиш имконини беради.



Сочилиш бурчаги  $90^\circ$

**1-расм. 4 МПнинг сувдаги эритмалар МБК силжишининг концентрация–температурага боғлиқлиги.**

1-расмда сочилиш бурчаги  $90^\circ$  да  $\Delta\nu(x, t)$  боғланишли экспериментал натижалар келтирилган. 4 МП концентрацияси камайиши билан эритмада ўрта концентрация соҳасида  $\Delta\nu$  текис ўзгармай максимум ўтади. Эритма температураси ортиши билан  $\Delta\nu(x)$  боғланишдаги максимум камроқ намоён бўлади ва унинг вазияти концентрация ўқи кичик соҳалари томон силжийди.  $\Delta\nu(x)$  боғланишдаги максимум вазияти концентрация чизиғида ёруғлик сочилиш бурчагига боғлиқ бўлмай, фақат эритма температураси билан аниқланади.

Кичик концентрацияли эритмаларда  $\Delta v(x)$  боғланиш изотермаларда кўшимча максимум кузатилади (1-расм). Бу максимум вазияти концентрация ўқи бўйича эритма температурасига боғлиқ бўлмайди. Сочилиш бурчаги ортиши билан максимум бироз кичик концентрациялар томон силжийди.

$x \geq 0,4$  м.қ. концентрация соҳасида МБК силжишининг температуравий коэффиценти манфий ( $x = \text{const}$  да  $\Delta v(t)$   $t$  бўйича ҳосиласи) бўлиб эритма концентрацияси ва температурасига боғлиқ эмас.

$0,1 \leq x < 0,4$  м.қ. концентрация соҳасида МБК силжишининг температуравий коэффиценти манфий бўлиб, эритма температурасига эмас, балки унинг концентрациясига боғлиқ бўлиб қолади.  $x$  нинг камайиши билан температуравий коэффицент камаяди (абсолют қиймат бўйича). Концентрацияси  $x < 0,1$  м.қ. температуравий коэффицент эритма концентрациясига ҳам, температурасига ҳам боғлиқ бўлади ва МБК силжишининг температуравий коэффиценти ишорасининг инверсияси кузатилади.  $x$  камайиши билан инверсия нуқтаси юқори температуралар соҳасига силжийди.

Таҷрибаларда аниқланган МБК силжиш катталиги температура ва концентрацияга боғлиқ равишда ўзгариш қонуниятлари 4 МП–сув эритмаларининг термодинамик ҳолати ўзгаришини намоён қилади. Эритма ҳолатининг ўзгаришини қуйидаги кўрсаткичлардан бирининг ўзгариши билан изохлаш мумкин: 1) концентрация ( $d(\Delta v)/dx$ ) бўйича МБК силжиши ҳосиласи ишораси билан; 2) температура ( $d(\Delta v)/dx$ ) бўйича МБК силжиши ҳосиласи ишораси билан.

Тадқиқ қилинган эритмаларда температура ва концентрациянинг ўзгариши билан боғлиқ ҳеч қандай кимёвий реакциялар рўй бермайди. Демак, эритманинг турли ҳолатлари унда содир бўладиган структуравий ўзгаришлар билан боғлиқ. Эритманинг бир структурадан бошқасига ўтиши (температура ўзгармаган ҳолда) концентрация ўзгариши билан ва (концентрацияси ўзгармаган ҳолда) температура ўзгариши билан содир бўлиши мумкин.

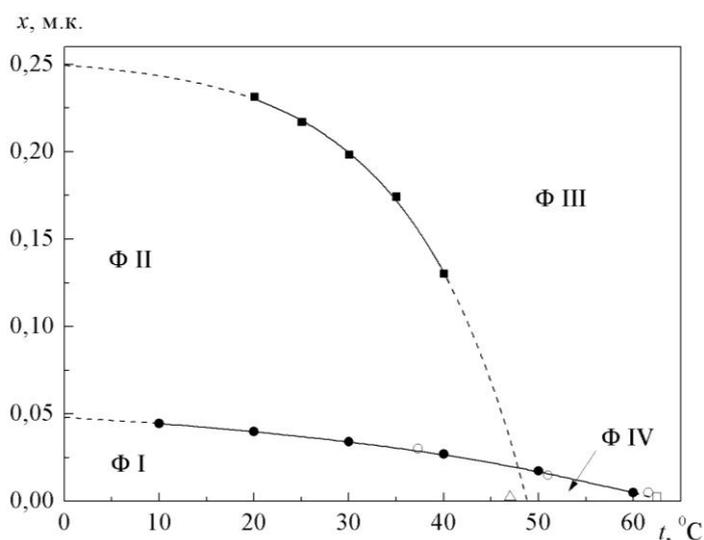
Эритмаларда мавжуд турли структура соҳалари чегарасини аниқлаш мақсадида суюқлик структураси билан чамбарчас боғлиқ бўлган термодинамик параметр – адиабатик сиқилувчанлик ўрганилди. Сиқилувчанлик суюқлик структураси (ички тузулиши) билан боғлиқ бўлган катталиклардан биридир. Шу сабабли унинг хоссалари характеристикалари (адиабатик сиқилувчанликнинг ортиқча моллиси, парциал адиабатик сиқилувчанлиги) аниқлаш эритмалар ички тузилишини ўрганишда кенг тарқалган усул ҳисобланади.

Ультратовуш тезлигини ўлчаш, асосан, суюқликларнинг адиабатик сиқилувчанлигини  $\beta_s = 1/(\rho V^2)$  ( $\rho$  – зичлик,  $V$  – товуш тезлиги) тадқиқ қилиш бўйича қилинган ишлар жуда кўп. Сувли эритмаларнинг юқори частоталарда (гипертовуш) сиқилувчанлиги тўғрисида экспериментал маълумотлар йўқ.

Эритмада 4 МП концентрацияси камайиши билан  $\beta_s$  катталик нотекис (номонотон) ўзгаради ва ўртача концентрация соҳасида минимумдан ўтади

( $t=\text{const}$  да  $x$  бўйича  $\beta_S(x)$  ҳосила ишораси инверсияси). Температура ортиши билан  $\beta_S(x)$  боғланишдаги минимум кам намоён бўлиб қолади ва унинг вазияти концентрация шкаласи бўйича кам концентрация томонга силжийди.  $\beta_S(x)$  боғланишнинг концентрация ўқи бўйича минимум вазияти частотага боғлиқ бўлмайди. Ультратовуш соҳасидан гипертовуш соҳасига ўтса ҳам, фақатгина эритма ҳарорати билан аниқланади.

Кичик концентрацияли ( $x < 0,1$  м.к.) эритмаларда  $\beta_S(t)$  содда чизикли боғланиш билан ифодаланмайди. Температура ортиши билан эритма сиқилувчанлиги олдин камайиб минимумдан ўтади, кейин температура ортиши билан ортиб боради. Сиқилувчанликнинг температуравий коэффициенти ( $x=\text{const}$  да  $t$  бўйича  $\beta_S(t)$  ҳосиласи) эритма концентрацияси ва температурасига ҳам боғлиқ. Сиқилувчанликнинг температуравий коэффициенти ишораси инверсияси ўринли бўлади ҳамда инверсия нуқтаси (температура)  $x$  камайиши билан юқори температура соҳасига силжийди.



Ф I:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt < 0$   
 Ф II:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt > 0$   
 Ф III:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt > 0$   
 Ф IV:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt < 0$   
 ■ –  $d\beta_S/dx=0$ , ● –  $d\beta_S/dt=0$

**2-расм. 4 МП сувдаги эритмаларида «температура–концентрация» координаталарининг диаграммаси ҳолатлари ( $\beta_S$  катталигининг нисбий ўзгариш қонунияти).**

$\beta_S(x)$  боғланиш изотермасида кичик концентрация соҳасида қўшимча минимум кузатилади. Ультратовуш частотасида бу концентрация соҳасида ҳеч қандай минимум кузатилмайди.

Температура ва концентрация бўйича  $\beta_S$  ҳосиласининг инверсия ишораси нуқталарини ҳосил қилувчи чизиклар, эритма турли ҳолатлари орасидаги структуравий ўтишлар чизикларини ифодалайди (2-расм). Бир ҳолатдан иккинчи ҳолатга ўтганда эритма концентрацияси ўзгарганда (температура ўзгармас) ҳам, эритма температураси ўзгарганда (концентрация ўзгармас) ҳам амалга ошади.

Олинган натижалар асосида «температура–концентрация» координатасида эритма ҳолати диаграммасида система структураси билан фарқ қилувчи тўртта соҳа (фаза) аниқланди (2-расм):

1)  $t-x$  соҳада  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt < 0$  (Ф I), эритмаларда водород боғланиш узлуксиз тўри сақланади, тоза сув структурасига хос бўлган ва тетраэдрик координацияли сув молекулалари ҳосил қилинган;

2)  $t-x$  соҳада  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt > 0$  (Ф II), эритмаларда водород боғланиш тўри ўзининг уч ўлчамли бутунлигини сақлаган лекин киритилган

ноэлектролитлар молекулалари ва иссиқлик нуқсонлари сони орттирилганлиги сабабли деформацияланган;

3)  $t-x$  соҳада  $d\beta_s/dx > 0$ ,  $d\beta_s/dt > 0$  (Ф III), эритмада кузатиладиган бутун ҳажмда водород боғланиш тўри мавжуд эмас (фрагментланган), эритмада ноэлектролит концентрацияси ёки температураси ортиши билан тўрнинг фрагментланиш даражаси ошади;

4) 4 МПнинг эритмадаги кичик концентрациясида шундай  $t-x$  соҳа борки, бу ерда  $d\beta_s/dx > 0$ ,  $d\beta_s/dt < 0$  (Ф IV). Бу кичик температура–концентрация оралиқда эритмада узлуксиз водород боғланиш тўри йўқ, лекин тоза сув структурасига мос ҳолда эритма структураси локал ҳолатда ўз хусусиятларини сақлайди.

Эритмада гипертovuш частотасида адиабатик сиқилувчанлик ҳақида олинган натижалар маълум температура ва концентрация оралиғида тоза сув ва сувли эритмаларда водород боғланиш узлуксиз тўрининг мавжудлигини исботлайди. Шунингдек, эритмада ноэлектролит концентрацияси ва температураси ортиши билан бу тўрнинг деформацияланган ҳолатидан деформацияланмаган ҳолатга ўтиши (трансформацияси) кейинчалик бузилишига (фрагменти) олиб келади.

Махсус нуқта концентрацияси  $x=0,06$  м.к. да (термодинамик турғунмас минимуми) эритмадаги гипертovuш частотасида сиқилувчанликнинг кўшимча минимуми аниқланди. Ультратовуш частотасида бу минимум кузатилмайди. Бу эса эритмада наноўлчам масштабида структура ҳосил қилиш жараёнлари намоён бўлишини кўрсатади. Эритмада структуравий биржинслимаслик ўлчами сиқилувчанлик минимуми чуқурлиги бўйича баҳолангани тахминан 10 нм тартибида.

Диссертациянинг тўртинчи боби «**Ноэлектролитлар сувли эритмалар махсус нуқтаси атрофида гипертovuш тарқалиши**» деб номланиб, ушбу бобда ноэлектролитларнинг сувдаги эритмаларида юқори частотали товуш тезлиги дисперсияси тадқиқ натижалари келтирилган. Гипертovuш частоталари соҳасида дисперсия  $D$  мутлақо янги усулда аниқланди. Бу усул асосида турли бурчак  $\theta$  остида сочилган ёруғликда МБКларининг частотавий силжиши  $\Delta\nu$  қийматлари бўйича дисперсиясини ҳисоблаш ётади:

$$D = 2 \times \left( \frac{\Delta\nu_1}{\Delta\nu_2} - \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right) \times \left( \frac{\Delta\nu_1}{\Delta\nu_2} + \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right)^{-1}.$$

Таклиф қилинаётган усулнинг анъанавий усуллардан афзаллиги шундаки, бу ерда  $D$  фақат МБКларининг частотавий силжиш қийматлари бўйича ҳисобланади. Турли частоталарда ўлчанган товуш тезликларини таққослашга нисбатан бу усулда гипертovuш тезлигининг абсолют қийматларини ҳисоблаш учун тадқиқ қилинаётган суюқликнинг нур синдириш кўрсаткичини ўлчашга зарурат қолмайди.

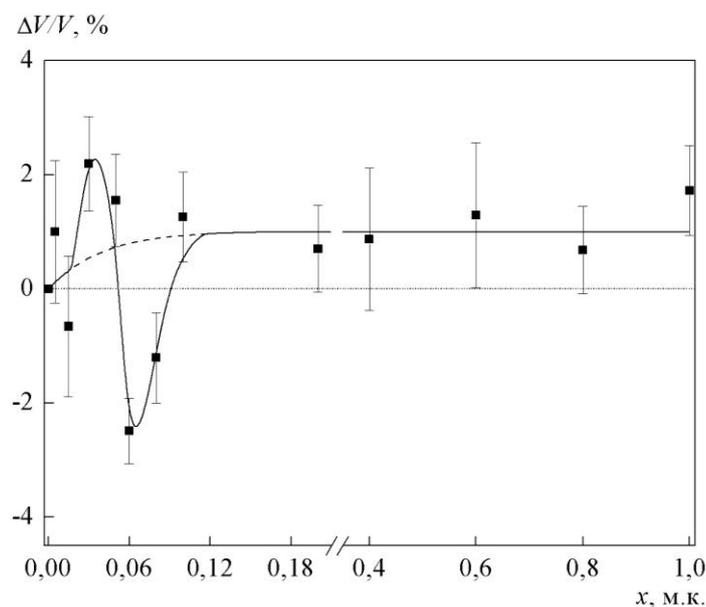
Товуш частотаси 4,8 ГГц дан 6,2 ГГц га ўтганда ғайритабиий физик ҳодиса аниқланди. Унга кўра махсус нуқта атрофида эритма концентрацияси (0,06–0,08 м.к.) атрофида манфий дисперсия (гипертovuш частотаси ортиши

билан унинг тезлиги камайиши) аниқланди (3-расм). Дисперсия катталиги эритма температурасига боғлиқ бўлмайди.

Бу ҳодисанинг тўлиқ манзарасини ҳосил қилиш учун 0,06 м.к. концентрацияли эритма алоҳида тадқиқ этилди. Бу эритмада 5,4 МГц, 2,6 ГГц, 4,8 ГГц ва 6,2 ГГц частоталарда товуш тезлигининг температурага боғлиқлиги ўрганилди.

5,4 МГц дан 4,8 ГГц частота оралиғида эритмада товуш тезлигининг мусбат дисперсияси кузатилади. Релаксация назарияси асосида қилинган таҳлиллар шуни кўрсатдики, температура 30 дан 50° С гача ўзгарганда ҳажмий қовушқоқлик релаксацияси вақти  $\tau=9,3 \times 10^{-11}$  секунддан  $\tau=7,7 \times 10^{-11}$  секундгача ўзгаради ва мусбат дисперсия ҳажмий қовушқоқлик релаксацияси билан изоҳланади.

5,4 МГц дан 4,8 ГГц частота оралиғида ультратовуш ва гипертovuш тезликлари қийматлари  $V_0$  ва  $V_\infty$  жараёнлар чегаравий тезликларга яқин.



Узлуксиз чизик – тажриба натижаларини мослаштириш. Узлукли чизик – концентрация  $x < 0,1$  м.к. соҳасидаги дисперсиянинг доимий қийматлари.

**3-расм. 4 МП-сув эритмаларининг 20° С температурасида концентрацияни гипертovuш тезлиги дисперсиясига боғлиқлиги.**

Тадқиқ қилинган эритмаларда аниқланган товуш тезлигининг манфий дисперсияси принципаал аҳамиятга эга бўлиб, махсус нуқта температурасидан пастда эритманинг микрогетероген тузилиши билан асосланади. Суюқликларда манфий дисперсиянинг намоён бўлиш шароитлари Гинзбург ва Владимирскийларнинг назарий ишларида муҳокама қилинган. Бу ишлар хулосалари бўйича баҳоланган фазовий биржинслимаслик ўлчами тадқиқ қилинган эритмада тахминан 10–13 нм бўлиб, эритма температурасига боғлиқ эмас. Бу эса тартибланган флукуацион соҳалар ҳосил бўлувчилари эмас, балки эритма ички структураси элементиدير. Демак, махсус нуқта температурасидан паст температураларда эритмаларда умумий структурасидан фарқ қилувчи структурали тартибланган соҳалар вужудга келади. Бошқача айтганда, махсус нуқта эритмаларида структуравий турдаги фазавий ўтишлар мавжуд бўлиб, ушбу фазавий ўтиш температураси махсус нуқта температураси билан мос келади.

Бу фаразни текшириш мақсадида суюқликларда структуравий-фазавий ўтишларни ўрганиш учун мос келувчи усул таклиф этилди. Бу усул ёруғликнинг Мандельштам–Бриллюэн сочилиш спектри бўйича гипертөвуш ютилиш коэффициентини ва тезлигининг температуравий коэффициентини ўрганиш усулидир. Тадқиқ қилишда махсус нуқтага эга бўлган эритмалар билан биргаликда махсус нуқтага эга бўлмаган лекин кичик концентрациялар соҳасида қатор физик параметрларнинг аномалияси (махсус чизиқли эритма) кузатилаётган эритмалар ҳам ўрганилди. Диссертацияда махсус нуқтали 4 метилпиридин–сув, 3 метилпиридин–сув, ацетон–сув, шунингдек, махсус чизиқли концентрацияси  $x=0,04$  м.қ. ли учланган бутил спиртининг (УБС) сувдаги эритмасида Мандельштам–Бриллюэн сочилиш спектри бўйича гипертөвуш ютилиш коэффициентини ва тезлигининг температуравий боғлиқлиги тадқиқотлари келтирилган.  $x=0,04$  м.қ. концентрацияли УБСнинг сувдаги эритмасида концентрацион боғланишда ёруғлик сочилиши интенсивлиги аномал максимумга мос келади. Бу максимум табиати ҳозирги вақтда ҳам илмий адабиётларда тортишув мавзусига айланиб қолмоқда.

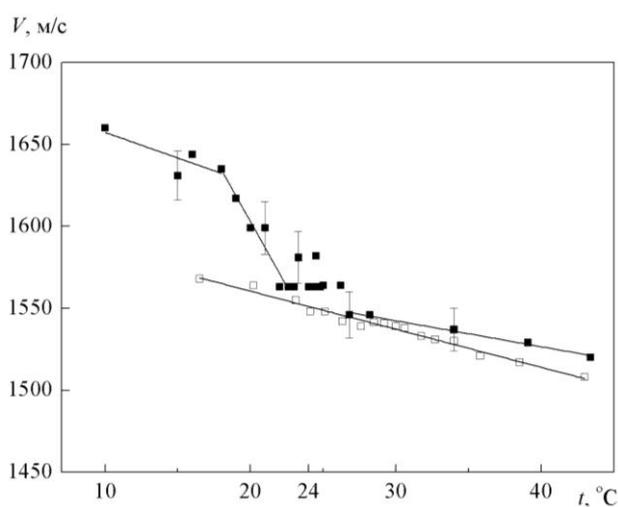
Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, гипертөвушнинг УБС–сув эритмасидаги тезлиги  $V(t)$  температура коэффициенти тезлигининг  $B=dV/dt$  турлича бўлган иккита чизиқли соҳадан иборат бўлади. Температура бўйича турли  $B$  қийматлари билан  $V(t)$  боғланишнинг ўтиши қисқа температура ( $43-44^\circ$  С) оралиғида бўлади. Бу оралиқ чегарасида гипертөвуш тезлиги сакраб ўзгариши билан намоён бўлади. Олдин биз гипертөвуш тезлиги температуравий коэффициентининг ўзгариши концентрацияси 0,19 м.қ. бўлган эритмада  $10^\circ$  С бўлишини аниқлаган эдик (шу концентрацияга флукутацияси натижасида ёруғлик сочилиш интенсивлигининг максимуми тўғри келади). Тезлигининг температуравий коэффициенти ўзгариши шуни кўрсатадики, битта шу система (УБСнинг сувдаги эритмасида)  $dV/dt$  фарқ қилувчи қийматлар соҳаларида турлича ҳолат тенгламалари билан изоҳланади.

Бу ишда УБСнинг сувдаги эритмасида концентрация флукутацияси корреляция (мослашув) узунлиги минимуми координатлари  $t-x$ , гипертөвуш  $dV/dt$  ўзгариши ва гипертөвушнинг изотермадаги  $V(x)$  максимумларига мос келиши аниқланди. Олинган натижалар адабиётлардаги маълумотлар билан биргаликда назарий тахмин қилинган етиб бўлмас юқори ва пастки критик нуқталар қатламланишининг мавжуд эканлигига мос келади. Юқори температурали критик соҳадан паст температурали соҳага ўтишда структуравий фазовий ўтиш билан содир бўлади. Олинган натижаларни турли частоталарда гипертөвуш тезлиги ва концентрация флукутацияси корреляция радиусининг температура–концентрация тадқиқотлари натижалари билан солиштириб, УБСнинг сувдаги эритмаси ҳолати диаграммасини кўрсатувчи турли структурали эритмаларнинг (температура ва концентрация бўйича) бир-бирига ўтиш чизиғи тузилди.

Ацетон–сув эритмасида (махсус нуқтанинг температура ва концентрацияси мос равишда  $24^\circ$  С ва 0,4 м.қ.) ультратөвуш (30,3 МГц) ва гипертөвуш ( $\sim 2,6$  ГГц) тезликларининг температурага боғлиқлиги ҳамда

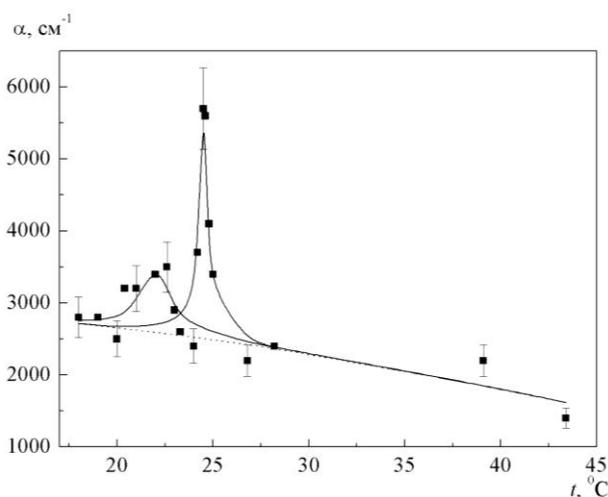
махсус нуқта температураси атрофида гипертвовуш ютилиш коэффициентлари ўрганилди (4–5-расмлар).

Эритмаларнинг махсус нуқта температурасидан юқорида ультратовуш ва гипертвовуш тезликлари температурага чизиқли боғланган. Товуш тезлиги дисперсияси эксперимент хатолигидан ошмайди. Ультратовуш ва гипертвовуш тезликларининг температуравий коэффициентлари бир хил. Махсус нуқтага яқин кичик температура оралиғида гипертвовуш тезлиги температурага ( $dV/dt=0$ ) боғлиқ бўлмайди. Махсус нуқта температурасидан пастда гипертвовуш тезлигининг температурага чизиқли боғланган иккита температура оралиғини ажратиш мумкин, бу ораликда температура коэффициентлари сезиларли фарқланади.  $t \leq 18^\circ \text{C}$  да гипертвовуш тезлиги температура коэффициентлари ультратовуш тезлиги температура коэффициентига тахминан тенг.



Узлуксиз чизиқлар – тажриба натижаларини мослаштириш.

**4-расм. Ацетон–сув эритмаси температурасининг ультратовуш (□) ва гипертвовуш (■) тезликларига боғлиқлиги.**



Узлуксиз чизиқ – назарий ҳисоблаш натижалари. Узлукли чизиқ – ютилишнинг фон (критик бўлмаган) қисми.

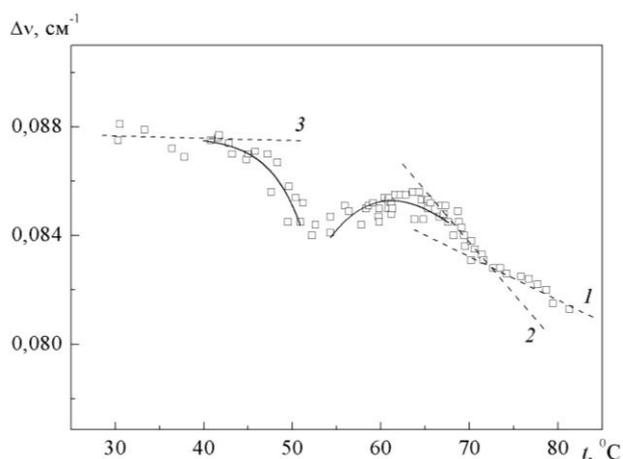
**5-расм. Ацетон–сув эритмаси температурасининг гипертвовуш ютилиш коэффициентига боғлиқлиги.**

Эритма температурасининг ўзгариши билан гипертвовуш ютилиш коэффициентлари  $\alpha$  бир текис ўзгармайди.  $\alpha(t)$  боғланишда иккита максимум яққол кузатилади (5-расм). Биринчи максимум энсиз, интенсивлиги катта ва бу максимум махсус нуқта температурасида жойлашган. Иккинчисининг интенсивлиги камроқ ва кенгроқ, ушбу максимум тахминан  $2^\circ \text{C}$  пастроқ температурада жойлашган.

Махсус нуқта температураси атрофида ютилишнинг ортикча (критик) қисмининг температуравий боғлиқлиги  $\lambda$  эгри чизиқни эслатади, бу эса критик нуқта яқинида товуш ютилиши классик назариясига зиддир. Гипертвовушда частотанинг  $\Omega\tau \gg 1$  флукутация релаксация вақтига кўпайтмаси ва назариялар ютилишда критик улуши камайишини тахмин қилишади, экспериментда эса ютилишнинг критик қисми ортади.

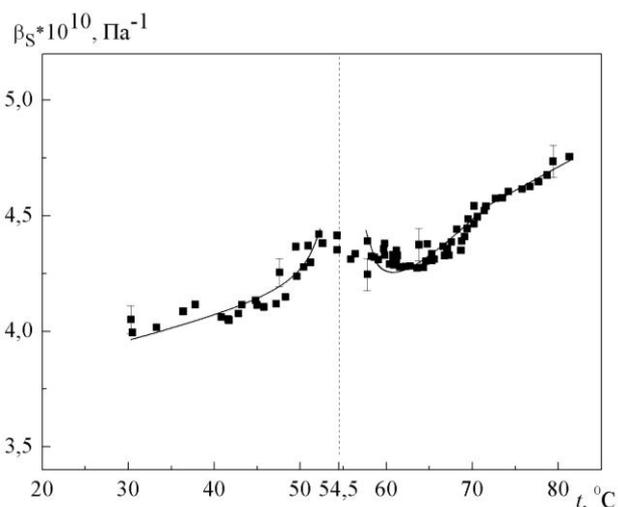
Диссертацияда кузатилаётган ортиқча ютилиш И.А.Чабан назарияси нуқтаи назаридан ифодалашга ҳаракат қилинган (ЖЭТФ, 2005. Т.127, 2-сон, 1-бет). Бу назария асосида критик нуқта яқинида гипертөвуш сўниш коэффициентининг ортиши тартиб параметри флуктуацияларида сочилиши эвазига ҳам содир бўлади, деган тахмин ўтади.

Ультратөвуш частоталарида ютилишда бундай ҳодиса рўй бермайди, чунки ультратөвуш тўлқин узунлиги флуктуация корреляцияси радиусидан анча катта. Назариянинг асосий моменти умумлашган қабул қилувчанлик  $\gamma$  критик индекси катталигини танлаш бўлиб, у махсус нуқта атрофида ютилиш критик қисмининг температуравий йўлини аниқлайди. Ушбу диссертация ишида олдиндан  $\gamma$  катталиги тўғрисида ҳеч қандай тахмин қилинмаган эди. Критик индекснинг ўзи экспериментал маълумотларнинг назарий формула бўйича ҳисобланган эгри чизикдан четлашининг ўртача квадрати йиғиндисини минималлаштириш йўли билан аниқланади.



1, 2 ва 3-узлукли чизиклар  $\Delta\nu(t)$  участкаси чизикларини кўрсатади. Узлуксиз чизиклар – температуралар интервалида  $\Delta\nu(t)$  ночизикли характерга эга.

**6-расм. 4 МПнинг сувдаги эритмасининг 0,06 м.қ. да МБК силжиши  $\Delta\nu$ нинг эритма температурасига боғлиқлиги (сочилиш бурчаги  $45^\circ$ ).**



■ – тажриба натижалари;  
узлуксиз чизиклар – ҳисоблаш натижалари.

**7-расм. 4 МПнинг сувдаги эритмасининг 0,06 м.қ. да адиабатик сиқилувчанлик  $\beta_s$ нинг эритма температурасига боғлиқлиги.**

$\gamma=1$ да тажриба ва назариянинг бир-бирига жуда яхши мос келиши аниқланди. Олинган натижа эритма махсус нуқтаси атрофида флуктуациянинг критик динамикаси Ландау назарияси билан ифодаланишини кўрсатди. Назария махсус нуқтадан пастдаги температуравий боғланиш  $\alpha$  иккинчи максимумини ҳам тушунтиради.

Гипертөвуш тезлиги ва ютилиш коэффициентининг бундай табиати биз ўрганган 3 метилпиридин ва 4 метилпиридинларнинг сувдаги эритмаларида махсус нуқта температураси атрофида кузатилган эди. Бу системаларда Ландау назариясига асосан топилган критик индекс билан И.А.Чабан

назарияси асосида тажрибада кузатилган гипертривушнинг керагидан ортикча ютилиш максимумларини изохлаш мумкин.

Ацетон–сув ва 3 метилпиридин–сув эритмаларидан фаркли равишда 4 метилпиридин–сув эритмасида паст температурали (кўшимча) ортикча ютилиш максимуми кучсиз намоён бўлади (тажриба хатолиги чегарасида). Бу (бошқа ўрганилган эритмаларга нисбатан) нокритик (фон) ютилиши катталиги билан изоҳланади. Лекин  $40\div 65^{\circ}\text{C}$  температура оралиғида Мандельштам–Бриллюэн компоненти силжишининг температуравий йўли иккинчи тур фазавий ўтиш критик нуктасига яқинлашишдаги товуш тезлиги ўзгариши хусусиятларига мос келади (6-расм).

Температуранинг 30 дан  $80^{\circ}\text{C}$  оралиғида эритманинг адиабатик сиқилувчанлиги  $\beta_S$  тадқиқ қилинди (7-расм). 7-расмда Мандельштам–Бриллюэн компоненти силжиш катталиклари бўйича эритманинг турли температурасида аниқланган  $\beta_S$  қийматлари келтирилган.  $\beta_S$ нинг сингуляр (критик) қисмини таҳлил қилишда бошланғич ҳолатда критик индекс қиймати тўғрисида ҳеч қандай тахмин қилинмаган эди. Фазовий ўтиш температураси  $T_C$   $53\div 55^{\circ}\text{C}$  оралиғида ўзгартирилиб турилди, мақсад  $T_C$  дан чап ва ўнг томондан  $\beta_S$  сингуляр қисми учун критик индекслари тенг бўлган қийматларини топиш натижада:  $T_C \approx 54,5^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma_1 = -1,08 \pm 0,07$ ,  $\gamma_2 = -1,06 \pm 0,12$  қийматлари топилди. Адиабатик сиқилувчанликнинг ҳисобланган қийматлари экспериментда олинган натижаларни яхши ифодалайди (7-расм). Сиқилувчанликнинг  $54,5^{\circ}\text{C}$  температурага яқинлашгандаги сингулярлик табиатини Ландау назарияси тахмин қилган иккинчи тур фазавий ўтиш критик индекси билан мос келувчи критик индекс ифодалайди.

Гипертривуш ютилишининг иккита максимуми мавжудлиги, адиабатик сиқилувчанлик табиати сингулярлиги ҳамда уларнинг мос равишда назарий ифодаланиши шуни кўрсатадики, температура бўйича тақсимланган, термодинамик стабиллиги минимум бўлган иккита ҳолат мавжуд.

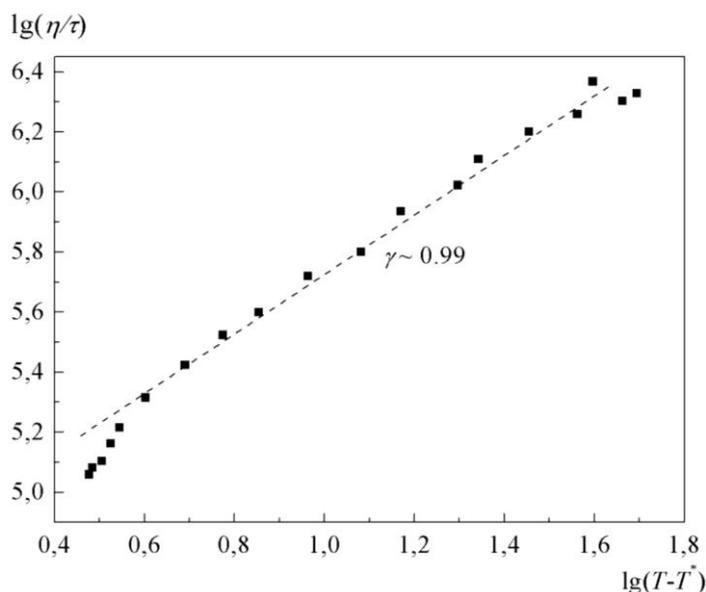
Махсус нукта температураси атрофида системанинг тартиб параметри флуктуацияси юқорилиги билан характерланади (эритма махсус нукта ҳолатида концентрация флуктуацияси), яъни иккиланган критик нуктага (ИКН) яқинлиги натижасида. ИКНга етиб бўлмаслиги флуктуация ўлчамини кесиб ташлайди (корреляция радиусини) ва уларнинг динамикаси Ландау назарияси критик индекси билан ифодаланади. Паст температураларда система термодинамик ностабил, лекин бу структуравий фазовий ўтиш натижасида рўй беради. Бу ҳолатда тартиб параметри флуктуацияси сифатида «коваклар» (яъни структура мавжуд бўлмаган соҳалар) концентрацияси флуктуацияси бўла олади. Коваклар концентрацияси флуктуацияси (структуравий фазовий ўтишдаги тартиб параметри) Ландау назарияси критик индекси орқали изоҳланади.

Диссертациянинг бешинчи боби «**Суюқ кристалларда фазавий ўтиш температураси яқинида ёруғликнинг анизотроп сочилиш спектрлари**» деб номланиб, ушбу бобда «изотроп суюқлик–суюқ кристалл» (ИС–СК) фазавий ўтиш температурасига яқинлашганда суюқ кристалл изотроп фазада кутбланмаган ёруғлик сочилиши Релей чизиғи қаноти спектри тадқиқотлари

келтирилган. ИС–СК Релей чизиғи қаноти (РЧҚ) кенглигининг бурчак ва температуравий кинетикаси тадқиқ этилган.

Олинган спектрлар таҳлили шуни кўрсатадики (изотроп фаза томонидан), ИС–СК фазовий ўтиш температурасига яқинлашганда РЧҚ спектри кескин сиқилади (энсизланади). Сочилиш чизиғи контури битта Лоренциан билан ифодаланади. Кенглиги эса фазавий ўтиш температурасига яқинлигида кучли боғлиқ бўлиб, сочилиш бурчагига боғлиқ бўлмайди.

Спектрлар юзасидан олиб борилган тадқиқотларга кўра ИС–СК температурасига яқинлашганда қанот энсизланади. «Изотроп суюқлик–суюқ кристалл» фазавий ўтиш атрофида тартиб параметри флуктуацияси корреляция радиуси ортиши натижасида молекуляр ориентацион ҳаракатчанлиги критик секинлашиши билан боғлиқ.



Узлукли чизик – чизикли худудига боғлиқлиги,  $\gamma$  – қабул қилувчанлик критик индекси,  $T^*$  – иккинчи тур фазавий ўтиш температураси.

**8-расм. ПААнинг изотроп фазасида  $\lg(\eta/\tau)$  катталигининг  $\lg(T-T^*)$  га боғлиқлиги.**

Олинган РЧҚ спектрларига асосан текширилган МББА ва ПАА намуналарда тартиб параметри флуктуациялари релаксация вақтининг  $\tau$  температуравий боғланиши аниқланди. ИС–СК ўтиш температурасига яқинлашганда релаксация вақтининг ортиши – флуктуация корреляция радиусининг ҳамда изотроп фаза қовушқоқлиги  $\eta$  нинг ортиши билан боғлиқ.

Олинган экспериментал натижаларнинг таҳлили қовушқоқлик томонидан температурага боғлиқ улушини эътиборга олмаса, қабул қилувчанлик критик индексининг анча юқори қийматларини беради. Демак, бу ҳодисани ифодалашда Ландау–де Жен назарияси қўлланиши чегарасини аниқлаш имкони бўлмайди.

Суюқ кристаллар изотроп фазасида учта температуравий ораликни ажратиш мумкин (8-расм). Бу чегаравий ораликларда тартиб параметри флуктуациялари релаксация вақтлари температурага турлича боғлиқ.

Корреляция радиуси ўлчами  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0$  – молекуланинг узунлиги ўлчами чамасида) температуравий интервалда релаксация вақтининг температуравий боғлиқлигини қабул қилувчанлик критик индекси  $\gamma=1$  бўлган Ландау – де Жен назарияси билан ифодалаш мумкин.

ИС–СК ўтиш температураси яқинида,  $\xi > 10\xi_0$  бўлганда, релаксация вақтининг ортиқча (назарияга нисбатан) ортишини кузатиш мумкин. Бу эса фазавий ўтиш яқинида изотроп фазанинг динамик параметрларининг кроссовер (ўртача майдондан флукуационга) табиати билан боғлиқ.

Юқори температураларда,  $\xi < 3\xi_0$  бўлганда, релаксация вақти температуравий боғланишининг ўзгариши кузатилади. Корреляция радиусининг камайиши натижасида молекулаларнинг катта бурчакка ориентирланишини характерловчи релаксация вақтининг температуравий боғлиқлиги кристалл бўлмаган суюқликлар учун хос боғланишга ўхшаш бўлиб қолади. Бунда анизотропия флукуацияси релаксация вақтининг температуравий ўзгариши, асосан, муҳит қовушқоқлиги билан аниқланади.

## ХУЛОСА

1. Суюқ кристалл фазавий ўтиш критик нуқтаси ва эритма махсус нуқтаси атрофида ёруғликнинг изотроп ва анизотроп сочилиш спектрларини тадқиқ қилишда ўзимизда ишлаб чиқилган экспериментал қурилмалар ва методлардан фойдаланилган. Частота бўйича стабиллаштирилган He-Ne лазери, сферик интерферометр ва юқори контрастли икки ўтувчи Фабри–Перо интерферометрларини қўллаш натижасида сочилган ёруғлик спектрида интенсивликнинг частотавий тақсимоти юзасидан ишончли маълумотлар олинган.

2. Илк бор ноэлектродитларнинг махсус нуқтали сувли эритмаларида сочилган ёруғлик спектрининг нозик структураси температураси ( $t$ ) ва концентрация ( $x$ ) ларнинг кенг оралиғида нотурғун термодинамик мувозанат махсус нуқтасини эътиборга олиб комплекс экспериментал тадқиқот ўтказилган. Температура ва концентрация ўзгарганда спектр нозик структураси частотавий силжиши билан эритма структураси қайта ўзгариши жараёни ўртасида бир қийматли корреляция мавжудлиги кўрсатилган.

3. Кичик концентрацияли эритмаларда водород боғланишининг узлуксиз тўри мавжудлиги экспериментал аниқланган. Ноэлектродитнинг эритмада концентрацияси ва температураси ўзгарганда тўрнинг уч ўлчамли бутунлиги ва бузилиш чегаралари мезонлари аниқланган. Температура бўйича  $d\beta_s/dt$  ва концентрация бўйича  $d\beta_s/dx$  адиабатик сиқилувчанлик ҳосиласининг ишораси алмашиши, эритма структуравий-мувозанатли ҳолатлари орасида ўтишларни ифодаловчи мезон бўлиши кўрсатилган.

4. Махсус нуқтали эритмада янги физик ҳодиса – гипертөвуш тезлиги манфий дисперсияси мавжудлиги экспериментал исботланган. Суюқликларда манфий дисперсия мавжуд бўлиши мумкинлигини назарий Владимирский ва Гинзбург айтишган эди. Дисперсиянинг экспериментал қиймати асосида ва Гинзбург назарияси хулосаси бўйича (фазовий дисперсияни ҳисобга олиб) эритма структураси корреляцион радиуси  $\sim 10$  нанометр қийматда бўлиши топилган.

5. Махсус нуқта температураси яқинида нозик структура компонентлари ортиқча спектрал кенгайиши тартиб параметри флукуацияларида

нокогерент сочилиш эвазига гипертовуш сўниш коэффиценти ортиши кўшимча механизми билан асосланган.

6. Тартиб параметрли флуктуациялар динамикаси тадқиқ этилган сувли эритмаларнинг температурали махсус нуктаси атрофида  $\gamma=1$  критик индексли умумлашган қабул қилувчанликка эга бўлган иккинчи тур фазавий ўтишлар учун Ландаунинг назарияси билан изоҳланиши аниқланган. Махсус нукта температураси яқинида флуктуацияларнинг корреляция радиуси  $\xi$  эритма ҳолатининг иккиланган критик нуктадан 3 МП–сув эритмада  $\sim 2-3$  нм, ацетон–сув эритмада  $\sim 7-10$  нм даража узоқлиги билан аниқланиши кўрсатилган.

7. 4 МП–сув эритмада махсус нукта температурасидан пастда структуравий типдаги «суюқлик–суюқлик» фазавий ўтиш мавжудлиги ва унинг ўтиш нуктаси атрофида спектрнинг нозик структураси компонентлари силжиши температурага боғлиқлигида намоён бўлиши тадқиқотларда исботланган. «Суюқлик–суюқлик» фазавий ўтишда тартиб параметри флуктуациялари динамикаси Ландау назарияси билан ифодаланиши, структуравий фазавий ўтиш температураси яқинида флуктуациялар корреляция радиуси  $\sim 5$  нм қийматга эга бўлиши тасдиқланган.

8. «Изотроп суюқлик–суюқ кристалл» фазавий ўтиш температурасига яқинлашганда анизотроп сочилиш спектри тортиш динамикаси ва тартиб параметри флуктуацияси релаксация вақтининг ортиши - умумлашган қабул қилувчанликнинг критик индекси  $\gamma=1$  бўлган Ландау – де Жен назарияси билан ифодаланиши аниқланган. Тартиб параметри флуктуацияси корреляция радиуси изотроп фаза динамик хусусиятларини ифодалашда назариянинг қўлланилиш чегараси топилган.

9.  $\xi$  флуктуация корреляция радиуси  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0 \approx 0,6$  нм – молекула узунлиги тартибидаги катталик) қийматга эга бўлганда температура интервалида параметри тартиб флуктуацияси динамикасини Ландау – де Жен назарияси билан изоҳлашни кўрсатилган. Фазавий ўтиш температураси яқинида ( $\xi_0 > 10\xi_0$ ) анизотроп сочилиш спектрининг торайиши ва релаксация вақтининг ортиқча ўсишининг изотроп фазали динамик хусусиятлари табиати кроссовер (ўрта майдонлидан флуктуационга) характерли эканлиги кўрсатилган.

10. Суюқликларнинг махсус ва критик нукта атрофида сочилган ёруғлик спектрал таркиби куйидаги қонунятлар билан аниқланган: 1) суюқ кристаллда фазавий ўтиш температураси яқинида анизотроп сочилиш спектрининг торайиши; 2) эритма махсус нуктаси атрофида спектр нозик структураси компонентларининг ортиқча спектрал кенгайиши; 3) «суюқлик–суюқлик» фазавий ўтиш яқинида нозик структура компонентлари частотавий силжиши температуравий боғлиқлигининг сингулярлиги – универсал характерга эгаллиги, тартиб параметри флуктуациялари корреляция радиуси динамикаси билан изоҳланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 при ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ  
ИНСТИТУТЕ, ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**СЕМЕНОВ ДЕНИС ИВАНОВИЧ**

**ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРА ПОРЯДКА  
В ЖИДКОСТЯХ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ОПТИЧЕСКИХ  
И АКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ**

**01.04.05 – Оптика (физико-математические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**Ташкент – 2016**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 28.04.2016/В2016.2.FM85 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан**

Докторская диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу [www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

**Научный консультант:** **Сабилов Леонард Мухаммеджанович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Каххаров Абдумуталиб Мамаджанович,**  
доктор физико-математических наук  
**Азаматов Закиржан Тахирович,**  
доктор физико-математических наук  
**Астанов Салих Хусенович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № \_\_\_\_). (Адрес: 100084, Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016 г.)

**С.Л. Лутпуллаев,**  
председатель Научного совета по присуждению  
ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

**А.В. Каримов,**  
ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

**И.Г. Атабаев,**  
председатель научного семинара при Научном совете  
по присуждению ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время в мире в связи с продолжающимся развитием физики фазовых переходов и кооперативных явлений в жидкостях, а также оптики сильнофлуктуирующих сред чрезвычайно актуальна проблема исследования физических процессов, протекающих в области критических и особых точек однокомпонентных жидкостей и растворов, когда начинают проявляться крупномасштабные корреляции и процессы структурного образования и распада на наноразмерных пространственных и временных масштабах. Данные исследования связаны с установлением особенностей взаимодействия коллективных степеней свободы среды (параметр порядка) с внутренними степенями свободы при фазовых переходах. Решение этой проблемы имеет важное научно-прикладное значение для практической реализации перспективных нано-технологических направлений в области современной биофизики, биохимии и биотехнологии.

Ценная информация для выявления коррелятивных свойств жидкостей на нано-масштабах может быть получена при изучении динамики изменения интегральной интенсивности, спектральной ширины и частотного смещения компонент тонкой структуры в спектре релеевского рассеяния света в окрестности критической и особой точек состояния жидкости. Исследование спектра молекулярного рассеяния света позволяет получать уникальную информацию о структуре и кинетических свойствах вещества ввиду того, что спектральный состав рассеянного света определяется динамикой флуктуаций различных термодинамических величин исследуемой среды. Однако практическая реализация такого рода исследования – весьма сложная экспериментальная задача. Вблизи критической точки регистрация тонкой структуры спектра осложняется высоким уровнем флуктуаций в среде, приводящим к сильному росту интенсивности рассеяния на частоте возбуждающего света. По этой причине до настоящего времени исследования тонкой структуры спектра рассеянного света в окрестности критических точек жидкостей весьма ограничены.

Востребованность темы диссертации обусловлена необходимостью установления закономерностей динамики флуктуационных и структурообразующих явлений на масштабах среднего молекулярного порядка в окрестности критических и особых точек состояния жидкости, а также развития спектроскопической методики инвазивной (бесконтактной) идентификации термодинамически устойчивых и неустойчивых состояний жидкости. Решение этой проблемы представляет важное значение для развития таких научно-прикладных направлений как создание строгой теории молекулярного рассеяния света в сильно флуктуирующих средах, теории жидкого состояния и получение материалов с контролируемыми свойствами.

Настоящая диссертация в определенной степени посвящена решению задач, указанных в Постановлении Президента Республики Узбекистан

ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011-2015 годах» от 15 декабря 2010 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан: ПФИ II – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Обзор международных научных исследований по теме диссертации.**

В ведущих мировых научно-исследовательских центрах, в том числе University of Maryland (США), University of Silesia (Польша), Institute of Industrial Science, University of Tokyo (Япония), Research Institute for Solid State Physics and Optics (Венгрия), Физическом институте РАН и Санкт-Петербургском государственном университете (Россия), Национальных университетах Киева и Одессы (Украина), а также в Самаркандском государственном университете (Узбекистан) проводятся исследования критического состояния жидкостей, проявления крупномасштабных корреляций в интегральных характеристиках рассеянного света и в характере распространения высокочастотного звука в окрестности критических и особых точек состояния жидкости.

На мировом уровне по научному направлению диссертационного исследования был решен ряд актуальных проблем и получены важные научные результаты: экспериментально выявлены общие черты, объединяющие критические точки жидкостей и другие фазовые переходы второго рода (University of Maryland, США); установлена определяющая роль взаимодействия (корреляции) флуктуаций в критических явлениях (Физический институт РАН, Россия); экспериментально установлен неаналитический (сингулярный) характер изменения физических свойств систем вблизи критических точек (University of Silesia, Польша); сформулированы условия наблюдения универсальности критических явлений и выдвинута гипотеза изоморфизма критических явлений (University of Tokyo, Япония; University of Maryland, США).

В настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные научно-исследовательские работы по изучению особой точки и двойной критической точки состояния жидкости, в частности, по таким актуальным направлениям как исследование тонкой структуры спектра рассеянного света в водных растворах неэлектролитов с особой точкой, спектральной ширины компонент тонкой структуры, установление характера дисперсии скорости распространения высокочастотного звука в окрестности особой точки раствора, разработка релаксационных и нерелаксационных механизмов дисперсии.

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время экспериментальное изучение фазовых переходов и критических явлений в жидкостях представляет собой обширную область актуальных физических задач. Теория светорассеяния в критической области жидкости разработана

Л.С. Орнштейном и Ф. Цернике. В общем случае фазовых переходов второго рода такая теория разработана В.Л. Гинзбургом и его учениками на основе теории фазовых переходов Л.Д. Ландау. Расслаивающиеся растворы представляют все общие свойства систем, в которых происходят фазовые переходы и критические явления. Поскольку картина фазовых переходов второго рода в разных средах имеет много общих черт (изоморфизм критических явлений), экспериментальное исследование спектра рассеяния света вблизи критической точки расслаивания позволяет получить информацию общего характера, т.е. пригодную для обсуждения критических явлений при фазовых переходах вообще и необходимую при создании микроскопической теории фазовых переходов.

Под руководством члена-корреспондента Российской академии наук И.Л. Фабелинского проведено детальное экспериментальное изучение спектров молекулярного рассеяния света в растворах с замкнутой областью расслаивания. В этих работах было установлено, что при приближении к критическим точкам наблюдаются явления, не находящие объяснения в рамках существующих теорий. Выявленный в экспериментах сильный рост поглощения гиперзвука вблизи температуры верхней и нижней критической точки расслаивания противоречит предсказаниям теории взаимодействующих мод, развитой в работах М. Фиксмана и К. Кавасаки, а также теории динамического скейлинга, сформулированной Л. Кадановым и Дж. Свифтом. Была также установлена значительная дисперсия скорости звука со стороны нижней критической точки и ее сильная зависимость от температуры, не объясняемая в рамках релаксационной теории М.А. Леонтовича.

Ученые из Узбекистана, в частности академики П.К. Хабибуллаев, А.К. Атаходжаев, проф. Ш. Отажонов, проф. Ф.Х. Тухватуллин, проф. Л.М. Сабиров, проводили исследования оптических и акустических характеристик растворов. В результате исследований были установлены особенности межмолекулярного взаимодействия в ряде бинарных систем и характерные времена релаксации различных процессов на молекулярном уровне. В Самаркандском государственном университете под руководством проф. Л.М. Сабирова проводятся работы по экспериментальному изучению флуктуационных и структурообразующих явлений вблизи критических и особых точек состояния жидкостей методами спектроскопии изотропного и анизотропного рассеяния света. В результате этих исследований установлен ряд новых физических явлений, требующих объяснения. Среди них – избыточное спектральное уширение компонент тонкой структуры спектра в окрестности критической точки расслоения и особой точки состояния бинарных растворов, сужение спектра анизотропного рассеяния вблизи критической точки расслоения раствора, нетривиальная частотная зависимость (дисперсия) скорости распространения высокочастотного звука в растворах с особой точкой. Полученные под руководством И.Л. Фабелинского и Л.М. Сабирова экспериментальные результаты стимулировали появление новых теорий, разработанных И.А. Чабан с учетом

механизма взаимодействия критических и некритических флуктуаций в растворах. Экспериментальное обоснование механизмов взаимодействия различного рода флуктуаций, их проявление в спектрах молекулярного рассеяния света, а также обобщение на широкий класс критических явлений при фазовых переходах в жидкостях является предметом интенсивных экспериментальных исследований научных школ И.Л. Фабелинского и Л.М. Сабирова.

**Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено по плану научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета в рамках научных проектов Ф2-2.1.45 «Исследование динамики флуктуаций параметра порядка и термодинамических величин в окрестности структурных и фазовых переходов методами акустооптики и лазерной спектроскопии спонтанного и вынужденного рассеяния света в растворах и жидких кристаллах» (2003–2007 гг.), ОТ-Ф2-004 «Взаимодействие флуктуаций в критических точках растворов и жидких кристаллов и их проявление в оптических и акустических явлениях» (2007–2011 гг.).

**Целью исследования** является установление физических механизмов проявления динамики флуктуаций параметра порядка в спектральном составе оптического излучения, рассеянного в окрестности критической и особой точки термодинамически неустойчивого состояния жидкости.

**Задачи исследования:**

изучить тонкую структуру спектра релеевского рассеяния света в водных растворах неэлектролитов с особой точкой в зависимости от концентрации, температуры и геометрии рассеяния. Выявить закономерности изменения частотного смещения и спектральной ширины компонент тонкой структуры в окрестности особой точки исследуемых систем;

установить границы существования структурно-равновесных состояний водных растворов неэлектролитов в координатах «температура–концентрация» и критерия идентификации переходов между различными структурными состояниями при изменении температуры и концентрации неэлектролита в растворе;

выявить характер дисперсии скорости высокочастотного звука в окрестности особой точки раствора, релаксационные и нерелаксационные механизмы дисперсии;

установить механизмы поглощения гиперзвука при приближении к особой точке раствора по тонкой структуре спектра рассеянного света;

установить закономерности критической динамики флуктуаций параметра порядка в окрестности особой точки раствора;

определить применимость среднеполевого приближения теории Ландау – де Жена для описания динамики флуктуаций параметра порядка вблизи температуры фазового перехода «изотропная жидкость – жидкий кристалл»;

установить характер универсальности динамики флуктуаций в жидкостях при фазовых переходах, описываемых различными параметрами порядка.

В качестве **объекта исследования** выбраны особая точка термодинамически неустойчивого состояния водного раствора и критическая точка фазового перехода в жидком кристалле.

**Предметом исследования** является динамика флуктуационных и структурообразующих процессов вблизи критической и особой точек состояния жидкости и их проявление в спектральном составе рассеянного лазерного излучения.

**Методы исследования.** В диссертации использованы методы лазерной спектроскопии изотропного и анизотропного рассеяния света и метод акусто-оптической спектроскопии, основанный на явлении дифракции лазерного излучения на ультразвуковых фоновых волнах. Высокие точности в измерении спектральных характеристик исследованных объектов были достигнуты путем применения в качестве источника возбуждающего излучения стабилизированного по частоте He-Ne лазера (630 нм) и спектральных приборов высокой разрешающей способности – высококонтрастного двухпроходного (плоский) интерферометра Фабри–Перо и сферического интерферометра.

**Научная новизна исследования** заключается в следующих результатах:

экспериментально доказан пространственный вклад в механизм дисперсии скорости высокочастотного звука в окрестности особой точки раствора, установлено микрогетерогенное строение раствора при температурах ниже особой точки с радиусом корреляции структурной неоднородности  $\sim 10$  нм;

экспериментально установлено проявление в тонкой структуре спектра процесса некогерентного рассеяния гиперзвука на флуктуациях параметра порядка. Установлено, что динамика флуктуаций параметра порядка описывается в рамках теории Ландау фазовых переходов второго рода. Обоснован механизм избыточного спектрального уширения компонент тонкой структуры в спектре рассеянного света в окрестности температуры особой точки раствора;

установлен фазовый переход «жидкость–жидкость» структурного типа в растворе при температуре ниже особой точки, показана применимость теории Ландау для описания динамики флуктуаций параметра порядка при структурном фазовом переходе;

выявлены физические механизмы сужения спектра анизотропного рассеяния света при приближении к температуре фазового перехода «изотропная жидкость – жидкий кристалл» и экспериментально доказано существование температурного интервала, в котором динамика изменения ширины спектра и времени релаксации флуктуаций параметра порядка описывается в рамках среднеполевого приближения теории Ландау – де Жена;

показано, что радиус корреляции флуктуаций параметра порядка определяет предел применимости теории Ландау – де Жена для описания динамики критических явлений в изотропной фазе жидкого кристалла, установлено существование области кроссовера от среднеполевого описания динамических свойств изотропной фазы к флуктуационному вблизи температуры фазового перехода;

экспериментально показана универсальность динамики флуктуаций параметра порядка в окрестности особой точки раствора, при фазовом переходе «жидкость–жидкость» структурного типа и при фазовом переходе «изотропная жидкость – жидкий кристалл».

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

Получены диаграммы структурно-устойчивых состояний водных растворов неэлектролитов в координатах «температура–концентрация».

Экспериментально доказано явление отрицательной дисперсии скорости высокочастотного звука в жидкости.

Установлен фазовый переход «жидкость–жидкость» структурного типа в окрестности особой точки раствора.

Определены критические индексы обобщенной восприимчивости для описания динамики флуктуаций параметра порядка при трех различных типах фазовых переходов в жидкостях.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается применением общепринятых научных методов, апробированных методик экспериментального исследования, высокой степенью воспроизводимости результатов эксперимента. Экспериментальные данные и выводы на их основе подтверждают предсказания теоретических работ Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбурга, П. де Жена, М.А. Леонтовича, В.В. Владимирского, И.А. Чабан в рамках исследуемой проблемы.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что они способствуют развитию разработки теории жидкостей с нелокальной релаксацией флуктуаций их параметров, обусловленной взаимодействием флуктуаций различной природы, а также наличием и изменением структуры в жидкости.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в экспериментальном обосновании применения тонкой структуры спектра рассеянного лазерного излучения для бесконтактной диагностики коррелятивных характеристик жидкостей на наноразмерных пространственно-временных масштабах. Установленные закономерности проявления крупномасштабных корреляций в жидкостях служат развитию таких актуальных научно-прикладных направлений, как создание строгой теории жидкого состояния и получение материалов с контролируемыми свойствами.

**Внедрение результатов исследования.** В диссертации развиты подходы по определению структурно-равновесных состояний растворов с

сеткой водородных связей и границ существования сплошной сетки водородных связей:

установленные структурно-равновесные состояния растворов с сеткой водородных связей и выявленные спектральные линии в тонкой структуре спектра рассеянного света использованы в гранте 08-02-90252-Узб\_а «Оптика фазовых состояний на границе ‘жидкость – газ’, ‘жидкость – жидкость’ и ‘жидкость – твердое тело’» при анализе спектральных характеристик кварцевых глобулярных кристаллов. Применение полученных результатов позволило повысить лучевую стойкость оптических фильтров с узкой полосой непрозрачности (Заключение от Научного центра волновых исследований Института общей физики Российской академии наук, 08.06.2015, Россия);

методика установления границ существования сплошной сетки водородных связей в растворах использована в гранте 0108U007555 «Роль водородных связей в формировании свойств воды и биорастворов. Изменение свойств сетки водородных связей под влиянием солей и протеинов» для теоретического анализа процессов кластеризации в водных растворах с особой точкой. Применение полученных результатов способствовало решению проблемы формирования структуры водных растворов на нано-размерных пространственно временных масштабах (Заключение от Национального университета, 16.02.2016, Украина).

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: 4<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Cairo, Egypt, 2005); XVI Conference on Liquid Crystals (Stare Jablonki, Poland, 2005); IV Конференция по физической электронике (Ташкент, 2005); 16<sup>th</sup> Symposium on Thermophysical Properties (Boulder, USA, 2006); III Международная конференция по молекулярной спектроскопии (Самарканд, 2006); International Conference on Bio-Nanotechnology (Al Ain, UAE, 2006); Республиканская конференция «Оптические методы в современной физике» (Ташкент, 2008); «Современная физика и ее перспективы» (2009, Ташкент); «Современные проблемы физики и физическое образование» (Самарканд, 2009); 7-я Всероссийская конференция «Необратимые процессы в науке и технике» (Москва, 2013); IV Международная конференция по актуальным проблемам спектроскопии конденсированных сред (Самарканд, 2013); II Международная конференция «Оптика и Фотоника - 2013» (Самарканд, 2013); VI Международная конференция по физической электронике (Ташкент, 2013); 7<sup>th</sup> International Conference on Laser Probing (East Lansing, USA, 2015), а также на семинаре физического факультета СамГУ (04.02.2016) и Научном семинаре при Научном совете 16.07.2013.FM/T.12.01 по присуждению ученой степени доктора наук при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете (30.03.2016).

**Опубликованность результатов исследования.** Полученные по теме диссертации результаты изложены в 44 научных трудах, которые полностью

отражают ее содержание; из них 20 научных статей опубликованы в журналах (15 в международных и 5 в республиканских), 24 публикации в виде тезисов и материалов республиканских и международных конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 200 страниц машинописного текста, 62 рисунка и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Спектры молекулярного рассеяния света и некоторые их применения при исследовании критических и особых точек состояния жидкости»** приведен литературный обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований спектров МРС в однокомпонентных жидкостях и растворах. Рассмотрено изменение спектра МРС в области критического состояния жидкости и вопросы применения спектров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для изучения гипер акустических параметров жидкости. Проведен анализ имеющихся литературных данных по вопросам изучения интенсивности и спектрального состава рассеянного света вследствие флуктуационных явлений и структурной самоорганизации молекул в водных растворах неэлектролитов, а также проблеме существования и обнаружения фазовых переходов типа «жидкость–жидкость».

Во второй главе **«Экспериментальная методика изучения спектрального состава рассеянного света вблизи критической и особой точек состояния жидкости»** описаны методы регистрации и расшифровки спектров МРС применительно к поставленным в настоящей работе задачам. Известно, что исследование спектров Мандельштам–Бриллюэновского рассеяния света в жидкостях с сильно развитыми флуктуациями сопряжено с рядом трудностей экспериментального характера. Это в основном и обуславливает относительно малое количество исследований в этой области. Интенсивность центральной компоненты релеевского триплета на 3-4 порядка величины превосходит интенсивность компонент Мандельштама–Бриллюэна, если последние исследуются в жидкостях с развитыми флуктуациями параметра порядка. В наших экспериментах наблюдение компонент Мандельштама–Бриллюэна в непосредственной близости от температуры фазовых и структурных переходов достигалось использованием двухпроходного интерферометра Фабри–Перо, позволявшего получать остроту интерференционной картины порядка 40 и контрастность  $\sim 4 \times 10^5$ .

Приведены описания экспериментальных установок, использованных в работе, методика учета формы аппаратного контура в спектрах крыла линии Релея (КЛР) и компонент Мандельштама–Бриллюэна (КМБ). Рассмотрены ошибки при получении спектров КМБ, связанные с конечностью апертуры коллиматорного объектива, и ошибки, обусловленные неточностью выставления угла рассеяния света. Приведена методика подготовки оптически чистых образцов исследуемых жидкостей.

В третьей главе «Спектры тонкой структуры в водных растворах с особой точкой в зависимости от температуры, концентрации и угла рассеяния» приведены результаты экспериментального изучения спектров тонкой структуры в водных растворах 4-метилпиридина (4МП). Особой точкой этой системы соответствуют концентрация  $x \approx 0.06$  м.д. и температура  $t \approx 70$  °С. Были изучены 12 систем: 11 растворов с концентрациями от 0.005 до 0.8 м.д. и чистый 4МП ( $x=1$  м.д.). Спектры рассеянного света регистрировались в интервале температур  $10 \div 80$  °С при углах рассеяния  $90$  и  $135$ °. В общей сложности было зарегистрировано и обработано более 1800 спектров, что позволило детально проследить за эволюцией величины частотного смещения  $\Delta\nu$  КМБ фактически во всей доступной для исследования области температур и концентраций.

На рис.1 представлена совокупность экспериментальных данных для зависимости  $\Delta\nu(x,t)$  при угле рассеяния  $90$ °. С уменьшением концентрации 4МП в растворе  $\Delta\nu$  изменяется немонотонно, проходя через максимум в области средних концентраций (рис.1). С увеличением температуры растворов максимум на зависимостях  $\Delta\nu(x)$  становится менее выраженным, а его положение по шкале концентраций смещается в область меньших концентраций. Положение максимума зависимости  $\Delta\nu(x)$  по шкале концентраций не зависит от угла рассеяния света, а определяется только температурой растворов.

Для растворов малых концентраций на изотермах зависимостей  $\Delta\nu(x)$  наблюдается дополнительный максимум (рис.1), положение которого по шкале концентраций не зависит от температуры растворов. С ростом угла рассеяния максимум немного смещается в область меньших концентраций.

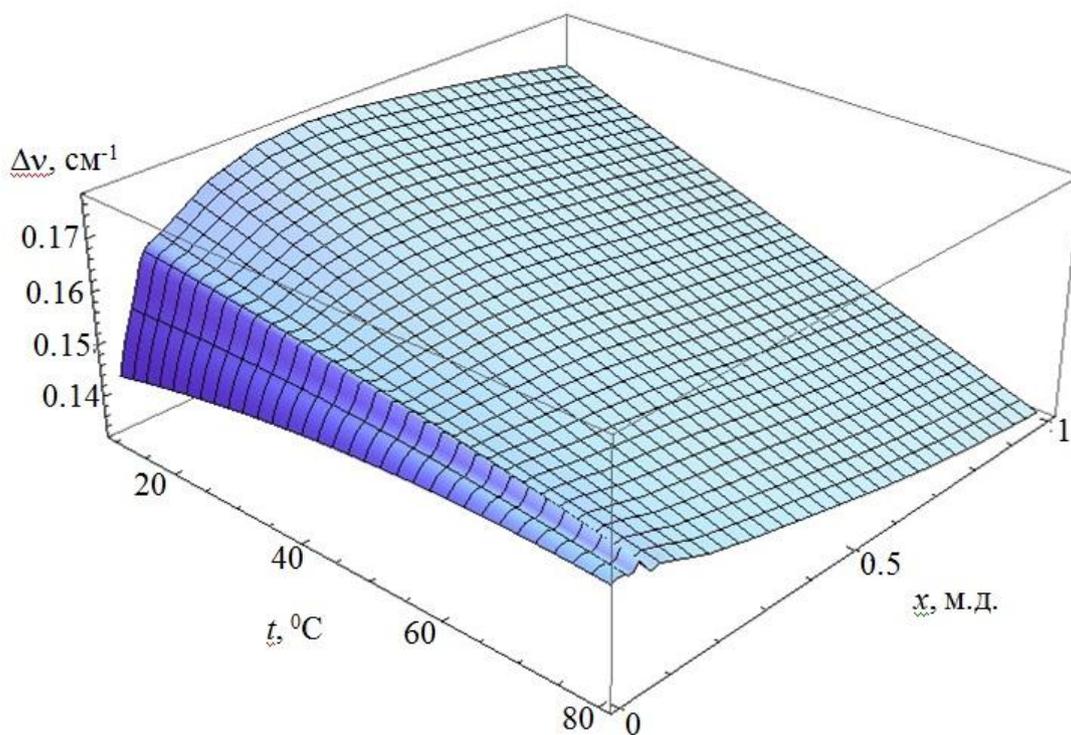
В области концентраций  $x \geq 0.4$  м.д. температурный коэффициент смещения КМБ (производная  $\Delta\nu(t)$  по  $t$  при  $x = \text{const}$ ) отрицателен и не зависит от температуры и концентрации раствора.

В области  $0.1 \leq x < 0.4$  м.д. температурный коэффициент смещения КМБ также отрицателен и не зависит от температуры раствора, но становится зависимым от концентрации раствора. С уменьшением  $x$  температурный коэффициент уменьшается (по абсолютной величине). При концентрациях  $x < 0.1$  м.д. температурный коэффициент зависит как от концентрации раствора, так и от его температуры, при этом наблюдается инверсия (смена) знака температурного коэффициента смещения КМБ. Точка инверсии с уменьшением  $x$  смещается в область более высоких температур.

Выявленные в эксперименте закономерности изменения величины смещения КМБ с температурой и концентрацией отражают изменение

термодинамического состояния водных растворов 4МП. Изменение состояния раствора можно идентифицировать по изменению одного из следующих показателей: 1) знака производной смещения КМБ по концентрации ( $d(\Delta v/dx)$ ) и 2) знака производной смещения КМБ по температуре ( $d(\Delta v/dt)$ ).

В исследованных нами растворах никаких химических реакций при изменении температуры и концентрации не происходит. Следовательно, различные состояния растворов обусловлены происходящими в них структурными изменениями. Переход от одной структуры к другой может осуществляться как при изменении концентрации раствора (при фиксированной температуре), так и при изменении температуры раствора (при фиксированной концентрации).



Угол рассеяния  $90^{\circ}$

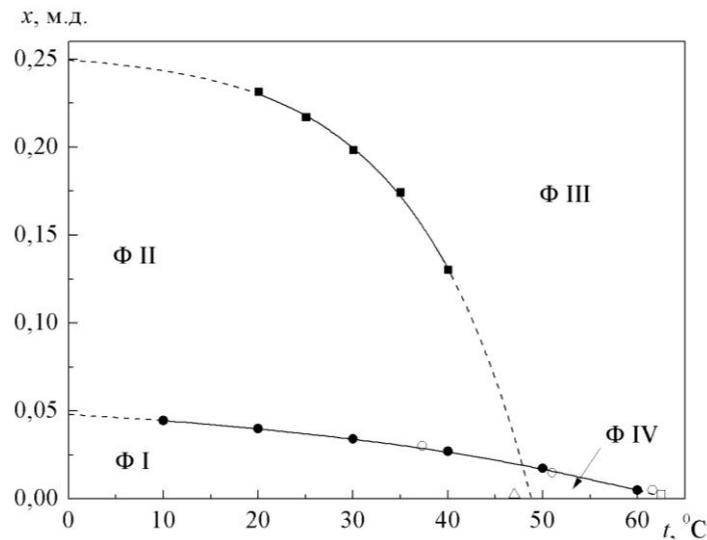
**Рис. 1. Концентрационно-температурная зависимость смещения КМБ в водных растворах 4МП.**

Для установления границ существования в растворах областей с различной структурой (линий структурных переходов) мы изучали адиабатическую сжимаемость растворов – один из параметров, связанных со структурой жидкости, поэтому определение этой и производных от нее характеристик (избыточной мольной адиабатической сжимаемости, парциальной адиабатической сжимаемости) является распространенным методом изучения структуры растворов.

Исследования адиабатической сжимаемости жидкостей  $\beta_s = 1/(\rho V^2)$  ( $\rho$  – плотность,  $V$  – скорость звука) по измерению скорости ультразвука достаточно многочисленны. Экспериментальные данные о сжимаемости

водных растворов на более высоких частотах (гиперзвук) фактически отсутствуют.

Результаты наших исследований показывают, что с уменьшением концентрации 4МП в растворе величина  $\beta_S$  изменяется немонотонно, проходя через минимум в области средних концентраций (инверсия знака производной  $\beta_S(x)$  по  $x$  при  $t=\text{const}$ ). С увеличением температуры минимум на зависимостях  $\beta_S(x)$  становится менее выраженным, а его положение по шкале концентраций смещается в область меньших концентраций. Положение минимума зависимости  $\beta_S(x)$  по шкале концентраций не зависит от частоты (длины волны) звука при переходе от ультразвука к гиперзвуку, а определяется только температурой растворов.



- Φ I:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt < 0$
- Φ II:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt > 0$
- Φ III:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt > 0$
- Φ IV:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt < 0$
- -  $d\beta_S/dx=0, \bullet$  -  $d\beta_S/dt=0$

**Рис. 2. Диаграмма состояния (относительно закономерностей изменения величины  $\beta_S$ ) водных растворов 4МП в координатах «температура – концентрация».**

В растворах малых концентраций ( $x < 0.1$  м.д.)  $\beta_S(t)$  не описывается простой линейной зависимостью. С увеличением температуры сжимаемость раствора сначала уменьшается, проходит через минимум и затем увеличивается с дальнейшим ростом температуры. Температурный коэффициент сжимаемости (производная  $\beta_S(t)$  по  $t$  при  $x=\text{const}$ ) зависит как от концентрации раствора, так и от его температуры. При этом имеет место инверсия знака температурного коэффициента сжимаемости, причем точка (температура) инверсии с уменьшением  $x$  смещается в область более высоких температур.

На изотермах зависимостей  $\beta_S(x)$  в области малых концентраций наблюдается дополнительный минимум. На ультразвуковой частоте какой-либо минимум в этой области концентраций отсутствует.

Линии, образуемые точками инверсии знаков производных  $\beta_S$  по концентрации и температуре, отражают линии структурных переходов между различными состояниями растворов (рис. 2). Переход из одного состояния в другое может осуществляться как при изменении концентрации раствора (при фиксированной температуре), так и при изменении температуры раствора (при фиксированной концентрации).

На построенной по нашим результатам диаграмме состояния растворов в координатах «температура–концентрация» (рис. 2) выявлены четыре области (фазы), характеризующиеся различной структурой системы:

1) в  $t$ - $x$ -области, где  $d\beta_S/dx < 0$ ,  $d\beta_S/dt < 0$  (Ф I), в растворах сохраняется непрерывная сетка Н-связей, образованных молекулами воды с тетраэдрической координацией, свойственной структуре чистой воды;

2) в  $t$ - $x$ -области, где  $d\beta_S/dx < 0$ ,  $d\beta_S/dt > 0$  (Ф II), сетка водородных связей в растворе сохраняет свою трехмерную целостность, но искажена (деформирована) внедренными в нее молекулами неэлектролита и возросшим количеством тепловых дефектов;

3) в  $t$ - $x$ -области, где  $d\beta_S/dx > 0$ ,  $d\beta_S/dt > 0$  (Ф III), сетка Н-связей во всем рассматриваемом объеме раствора перестает существовать (фрагментирована), степень фрагментации сетки увеличивается с ростом температуры или концентрации неэлектролита в растворе;

4) при малых концентрациях 4МП в растворе существует  $t$ - $x$ -область, в которой  $d\beta_S/dx > 0$ ,  $d\beta_S/dt < 0$  (Ф IV). В этом сравнительно небольшом температурно-концентрационном интервале непрерывная сетка Н-связей в растворе отсутствует, но структура раствора локально сохраняет свойства, присущие структуре чистой воды.

Полученные данные об адиабатической сжимаемости растворов на гиперзвуковой частоте доказывают существование в чистой воде и в водных растворах непрерывной сетки водородных связей в определенном интервале температур и концентраций, а также трансформации этой сетки из недеформированного состояния в деформированное, с последующим ее разрушением (фрагментации) при увеличении температуры и концентрации неэлектролита в растворе.

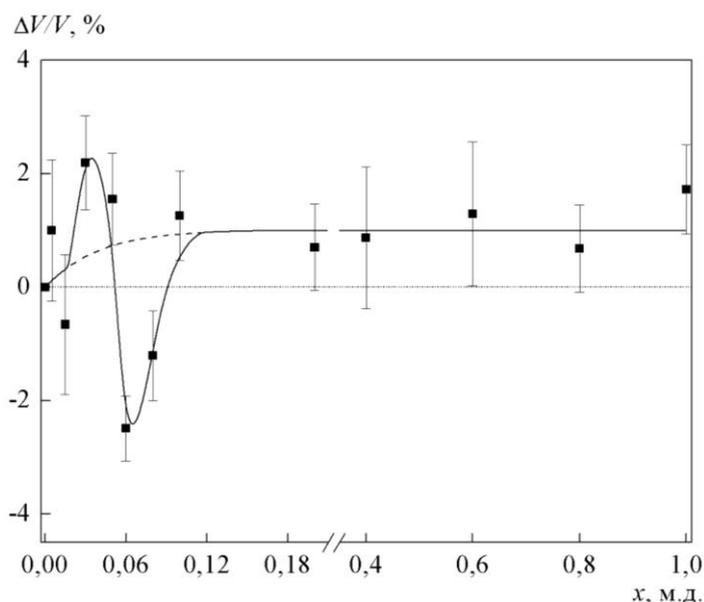
При концентрации особой точки  $x=0.06$  м.д. (минимум термодинамической стабильности) в растворе экспериментально обнаружен дополнительный минимум сжимаемости на частоте гиперзвука. На ультразвуковой частоте минимума не наблюдается, что указывает на проявление в растворе процессов структурообразования на наноразмерных масштабах (для ультразвука из-за относительно большой длины волны среда является сплошной). Характерный масштаб структурной неоднородности раствора, оцененный по глубине минимума сжимаемости, составляет величину порядка 10 нм.

В четвертой главе «**Распространение гиперзвука в водных растворах неэлектролитов в окрестности особой точки**» приведены результаты исследования акустических характеристик водных растворов на частоте гиперзвука по спектрам тонкой структуры. Значения дисперсии скорости звука  $D$  в растворах 4МП–вода были определены новым методом, в основе которого лежит расчет дисперсии непосредственно по значениям частотного смещения КМБ  $\Delta\nu$ , зарегистрированных при различных углах рассеяния света  $\theta$ :

$$D = 2 \times \left( \frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} - \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right) \times \left( \frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} + \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right)^{-1}.$$

Преимущество этого метода перед традиционным сопоставлением скоростей звука на различных частотах заключается в том, что величина  $D$  может быть рассчитана только по значениям частотного смещения КМБ. Соответственно исчезает необходимость расчетов абсолютных значений скорости гиперзвука, требующих измерения показателя преломления  $n$  исследуемой жидкости.

При переходе от частоты звука  $\sim 4.8$  ГГц к частоте  $\sim 6.2$  ГГц обнаружено необычное физическое явление – отрицательная дисперсия (уменьшение скорости гиперзвука с ростом его частоты) в узком интервале концентраций растворов ( $0.06 \div 0.08$  м.д.) в окрестности особой точки (рис. 3). Величина дисперсии практически не зависит от температуры раствора.



Сплошная линия – сглаживание экспериментальных данных, пунктирная – регулярные значения дисперсии в области концентраций  $x < 0.1$  м.д.

**Рис. 3. Концентрационная зависимость дисперсии скорости гиперзвука в водных растворах 4МП при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ .**

Для выявления полной картины дисперсии раствор с концентрацией  $x=0.06$  м.д. исследовали отдельно и подробно изучили температурные зависимости скорости звука на частотах 5.4 МГц, 2.6 ГГц, 4.8 ГГц и 6.2 ГГц.

В диапазоне частот 5.4 МГц – 4.8 ГГц в растворе наблюдается положительная дисперсия скорости звука. Анализ с позиций релаксационной теории показывает, что положительная дисперсия обусловлена процессом релаксации объемной вязкости, характерное время которого меняется от  $\tau=9.3 \times 10^{-11}$  с до  $\tau=7.7 \times 10^{-11}$  с при изменении температуры от 30 до  $50^{\circ}\text{C}$ .

Величины скорости ультразвука и гиперзвука на частотах 5.4 МГц и 4.8 ГГц близки к предельным скоростям данного процесса  $V_0$  и  $V_{\infty}$ .

Экспериментальное обнаружение отрицательной дисперсии скорости звука в исследованных нами растворах имеет принципиальное значение и может быть объяснено микрогетерогенным строением раствора ниже температуры особой точки. Условия проявления отрицательной дисперсии в жидкостях обсуждались в теоретических работах Гинзбурга и Владимирского. Оцененный по выводам их работ характерный размер

пространственной неоднородности в исследованном нами растворе составляет величину порядка 10-13 нм и практически не зависит от температуры раствора. Последнее свидетельствует о том, что упорядоченные области не являются флуктуационно возникающими образованиями, а представляют собой элемент внутренней структуры раствора. Следовательно, в растворах при температурах ниже температуры особой точки образуются упорядоченные области со структурой, в целом отличной от структуры раствора. Другими словами, в растворах с особой точкой должен быть фазовый переход типа структурного, температура которого совпадает с температурой особой точки.

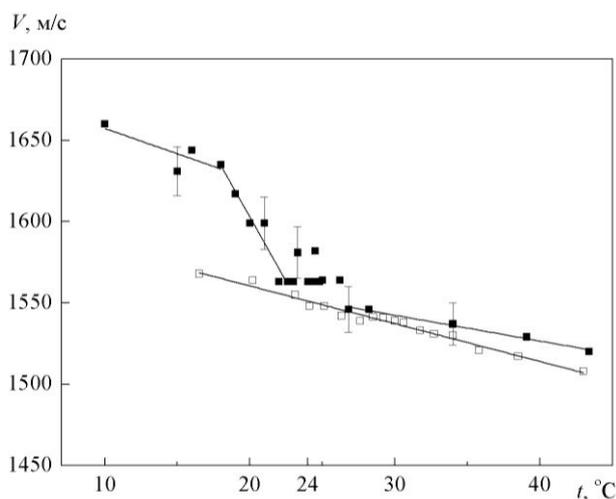
Для проверки этого предположения мы использовали адекватный метод обнаружения и изучения структурных фазовых переходов в жидкости. Таким методом служит изучение температурных коэффициентов скорости гиперзвука и коэффициента поглощения гиперзвука по спектрам рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. При этом были изучены как растворы с особой точкой, так и растворы, в которых особая точка отсутствует, но наблюдается ряд аномалий поведения физических параметров в области малых концентраций (раствор с особой линией). Были исследованы температурные зависимости скорости и коэффициента поглощения гиперзвука по спектрам рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в растворах с особой точкой (4-метилпиридин–вода, 3-метилпиридин–вода и ацетон–вода), а также в растворе с особой линией – водный раствор третичного бутилового спирта (ТБС) при концентрации  $x=0.04$  м.д. Эта концентрация соответствует так называемому аномальному максимуму на концентрационной зависимости интенсивности светорассеяния водных растворов ТБС, природа которого по настоящее время является предметом дискуссии в научной литературе.

Наши эксперименты показали, что температурная зависимость скорости гиперзвука  $V(t)$  в растворе ТБС–вода описывается двумя линейными участками с различными значениями температурного коэффициента скорости  $B=dV/dt$ . Переход по температуре между зависимостями  $V(t)$  с разными значениями  $B$  происходит в узком ( $\sim 43-44$  °С) интервале температур и сопровождается скачкообразным изменением скорости гиперзвука на границах этого интервала. Ранее нами было обнаружено изменение температурного коэффициента скорости гиперзвука при  $\sim 10$  °С в растворе с концентрацией 0.19 м.д., на которую приходится максимум интенсивности светорассеяния вследствие флуктуаций концентрации. Изменение температурного коэффициента скорости гиперзвука указывает на то, что одна и та же система (водный раствор ТБС) описывается различными уравнениями состояния в областях с различающимися значениями  $dV/dt$ .

В настоящей работе установлено, что для водных растворов ТБС  $t$ - $x$  координаты минимумов длины корреляции флуктуаций концентрации, изменений  $dV/dt$  гиперзвука и максимумов на изотермах  $V(x)$  гиперзвука совпадают. Наши результаты в сочетании с литературными данными согласуются с теоретическими представлениями о существовании недостижимых верхней и нижней критических точек расслаивания. Переход

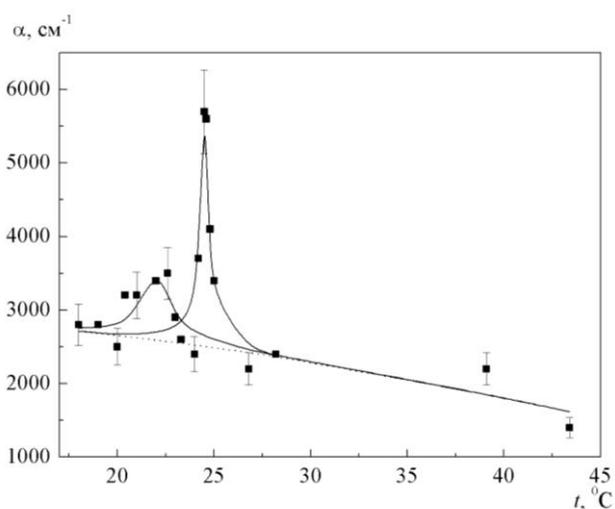
от высокотемпературной предкритической области к низкотемпературной сопровождается структурным фазовым переходом. Из сопоставления наших результатов с данными температурно-концентрационных исследований радиуса корреляции флуктуаций концентрации и скорости гиперзвука на разных частотах была построена диаграмма состояния водных растворах ТБС – линии переходов (по температуре и концентрации) между растворами с различной структурой.

В растворе ацетон–вода (температура и концентрация особой точки соответственно 0.4 м.д. и  $\sim 24^\circ\text{C}$ ) были изучены температурные зависимости скорости ультразвука (30.3 МГц) и гиперзвука (частота  $\sim 2.6$  ГГц), а также коэффициент поглощения гиперзвука в окрестности температуры особой точки (рис. 4 и 5).



Сплошные линии – сглаживание экспериментальных данных.

**Рис. 4. Температурная зависимость скорости ультразвука ( $\square$ ) и гиперзвука ( $\blacksquare$ ) в растворе ацетон–вода.**



Сплошные линии – теоретический расчет, пунктирная линия – фоновая (некритическая) часть поглощения.

**Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента поглощения гиперзвука в растворе ацетон–вода.**

При температурах выше ОТ в растворе скорости ультразвука и гиперзвука линейно зависят от температуры. Дисперсия скорости звука не превосходит экспериментальной ошибки. Температурные коэффициенты ( $dV/dt$ ) скорости ультразвука и гиперзвука одинаковы. В небольшом температурном интервале вблизи ОТ скорость гиперзвука не зависит от температуры ( $dV/dt=0$ ). При температурах ниже ОТ можно выделить два температурных интервала, в которых скорость гиперзвука линейно зависит от температуры, но с существенно различающимися температурными коэффициентами. Температурный коэффициент скорости гиперзвука при  $t \leq 18^\circ\text{C}$  приблизительно равен температурному коэффициенту скорости ультразвука.

С изменением температуры раствора коэффициент поглощения гиперзвука  $\alpha$  изменяется немонотонно, на зависимости  $\alpha(t)$  отчетливо

наблюдаются два максимума (рис. 5). Первый, сравнительно интенсивный и узкий максимум расположен при температуре особой точки. Второй, менее интенсивный и более широкий максимум наблюдается при температуре приблизительно на  $2^{\circ}\text{C}$  ниже.

Температурная зависимость избыточной части поглощения в окрестности температуры ОТ напоминает  $\lambda$ -кривую, что противоречит классическим теориям поглощения звука вблизи критической точки. В случае гиперзвука произведение частоты на время релаксации флуктуаций  $\Omega\tau \gg 1$  и теории предсказывают уменьшение критического вклада в поглощение, а в эксперименте критическая часть поглощения растет.

В настоящей работе проанализировано наблюдаемое в эксперименте избыточное поглощение с точки зрения современной теории И.А. Чабан (ЖЭТФ, 2005, т.127, №2, с.1). В основе этой теории лежит предположение о том, что в окрестности критической точки рост коэффициента затухания гиперзвука происходит также и за счет его рассеяния на флуктуациях параметра порядка.

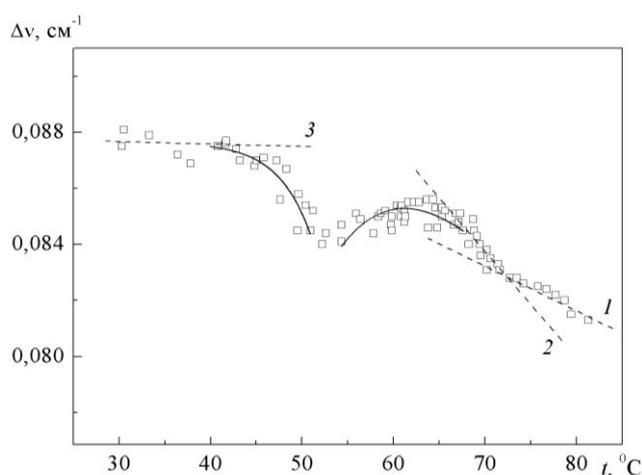
На ультразвуковых частотах такой вклад в поглощение отсутствует из-за того, что длина волны ультразвука намного превосходит радиус корреляции флуктуаций. Принципиальным моментом теории является выбор величины критического индекса обобщенной восприимчивости  $\gamma$ , определяющего температурный ход критической части поглощения в окрестности ОТ. В нашем исследовании никаких изначальных предположений о величине  $\gamma$  мы не делали, а сам критический индекс определяли путем минимизации суммы средних квадратов отклонений экспериментальных данных от кривой, рассчитанной по формулам теории.

Наилучшее согласие эксперимента и теории установлено при  $\gamma=1$ . Полученный результат показывает, что критическая динамика флуктуаций в окрестности ОТ раствора описывается в рамках теории Ландау, которая хорошо описывает и второй максимум на температурной зависимости  $\alpha$  ниже ОТ.

Отметим, что аналогичное поведение скорости и коэффициента поглощения гиперзвука наблюдалось и в изученных нами водных растворах 3-метилпиридина и 4-метилпиридина в окрестности температуры особой точки. В этих системах теория И.А. Чабан с критическим индексом, следующим из теории Ландау, хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте максимумы избыточного поглощения гиперзвука.

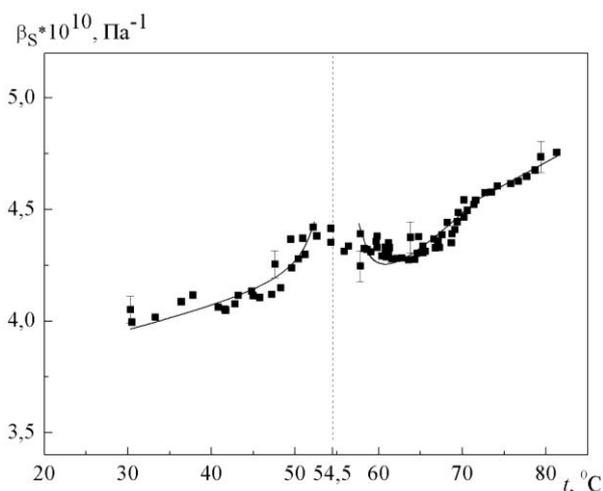
В отличие от растворов ацетон–вода и 3-метилпиридин–вода дополнительный (низкотемпературный) максимум поглощения в растворе 4-метилпиридин–вода выражен слабо (в пределах ошибок эксперимента), что вполне объяснимо сравнительно большим не критическим (фоновым) поглощением (по сравнению с другими изученными растворами). Однако температурный ход смещения КМБ в температурном интервале  $40\div 65^{\circ}\text{C}$  тождествен особенностям изменения скорости звука при приближении к критической точке фазового перехода второго рода (рис. 6).

Мы изучили адиабатическую сжимаемость  $\beta_S$  раствора в интервале температур  $\sim 30 - \sim 80$  °С. На рис. 7 приведены значения  $\beta_S$  при различных температурах раствора, определенные по величинам смещения КМБ. При анализе сингулярных (критических) частей  $\beta_S$  изначально не делалось никаких предположений о величине критического индекса  $\gamma$ . Температура фазового перехода  $T_C$  варьировалась в пределах  $53 \div 55$  °С для выявления такого значения, при котором критические индексы становятся равными для сингулярных частей  $\beta_S$  слева и справа от  $T_C$ .



Пунктирные линии (1, 2 и 3) – линейные участки  $\Delta\nu(t)$ , сплошные линии – температурные интервалы, где  $\Delta\nu(t)$  носит нелинейный характер.

**Рис. 6. Температурная зависимость смещения КМБ  $\Delta\nu$  в растворе 4МП–вода с концентрацией 0.06 м.д. (угол рассеяния  $45^\circ$ ).**



■ – экспериментальные данные, сплошные линии – результаты расчетов.

**Рис. 7. Зависимость адиабатической сжимаемости  $\beta_S$  от температуры в растворе 4МП–вода ( $x=0.06$  м.д.).**

В результате были получены значения:  $T_C \approx 54.5$  °С,  $\gamma_1 = -1.08 \pm 0.07$ ,  $\gamma_2 = -1.06 \pm 0.12$ . Рассчитанные значения адиабатической сжимаемости хорошо описывают полученные в эксперименте результаты (рис. 7). Сингулярность поведения сжимаемости при приближении к температуре  $\sim 54.5$  °С описывается критическим индексом, совпадающим с предсказываемым теорией Ландау для фазовых переходов второго рода.

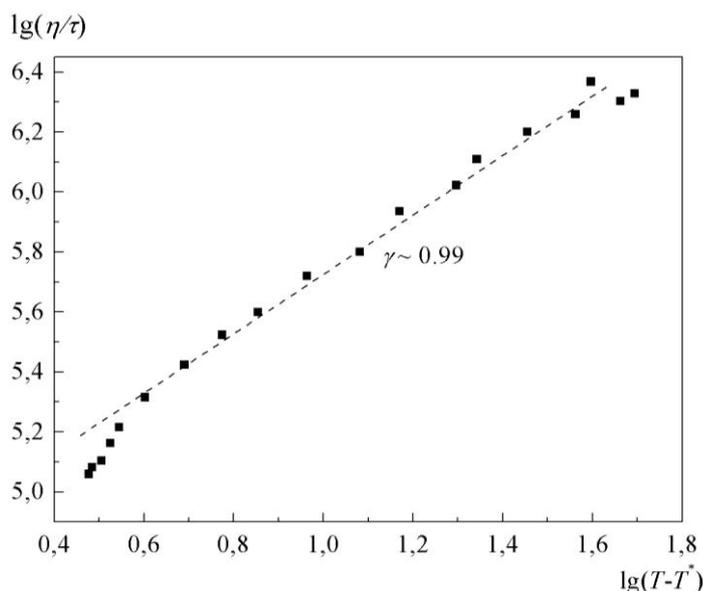
Наличие двух максимумов поглощения гиперзвука, сингулярности поведения адиабатической сжимаемости, а также согласованное их описание в рамках теории указывает на существование в изученных растворах двух различных состояний с минимумом термодинамической стабильности, разнесенных по температуре.

В окрестности температуры ОТ система характеризуется достаточно высоким уровнем флуктуаций параметра порядка (флуктуаций концентрации в случае ОТ раствора) из-за наибольшей близости к ДКТ. Недостижимость ДКТ «обрезает» радиус корреляции флуктуаций и их динамика описывается критическим индексом теории Ландау. При меньшей температуре система

также термодинамически нестабильна, но уже, по-видимому, вследствие структурного фазового перехода. Флуктуациями параметра порядка в этом случае являются флуктуации концентрации «дырок» (т.е. областей, в которых структура отсутствует). Динамика флуктуаций концентрации дырок (параметра порядка при структурном фазовом переходе) также описывается критическим индексом теории Ландау.

В пятой главе «Спектры анизотропного рассеяния лазерного излучения вблизи температуры фазового перехода в жидких кристаллах» приведены результаты исследования спектров крыла линии Релея в изотропной фазе жидких кристаллов при приближении к температуре фазового перехода «изотропная жидкость – жидкий кристалл» (ИЖ–ЖК). Была исследована угловая и температурная кинетика ширины крыла линии Релея (КЛР).

Анализ полученных спектров показывает резкое сужение спектра КЛР при приближении к температуре перехода ИЖ–ЖК. Контур линии рассеяния описывается одним лоренцианом, ширина которого сильно зависит от близости к температуре перехода и не зависит от угла рассеяния света.



Пунктирная линия – линейный участок зависимости,  $\gamma$  – критический индекс восприимчивости,  $T^*$  – температура фазового перехода второго рода.

**Рис. 8. Зависимость величины  $\lg(\eta/\tau)$  от  $\lg(T-T^*)$  в изотропной фазе ПАА.**

Сужение крыла при приближении к температуре ИЖ–ЖК обусловлено критическим замедлением ориентационной подвижности молекул из-за роста радиуса корреляции флуктуаций параметра порядка в окрестности фазового перехода ИЖ–ЖК.

По полученным спектрам КЛР определены температурные зависимости времени релаксации флуктуаций параметра порядка  $\tau$  в исследованных образцах МБА и ПАА. Показано, что при приближении к температуре перехода ИЖ–ЖК увеличение времени релаксации обусловлено как ростом радиуса корреляции флуктуаций, так и ростом вязкости  $\eta$  изотропной фазы.

Анализ полученных экспериментальных результатов без учета температурно-зависящего вклада со стороны вязкости дает завышенные значения критического индекса восприимчивости и, следовательно, не

позволяет достоверно определить пределы применимости теории Ландау–де Жена для описания явления.

В изотропной фазе жидких кристаллов можно выделить три температурных интервала, в пределах которых времена релаксации флуктуаций параметра порядка по-разному зависят от температуры (рис. 8).

В области температур при размере радиуса корреляции  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0 \approx 0.6$  нм – величина порядка длины молекулы) температурная зависимость времени релаксации описывается в рамках теории Ландау–де Жена с критическим индексом восприимчивости  $\gamma=1$ .

Вблизи температуры ИЖ–ЖК перехода, где  $\xi > 10\xi_0$ , наблюдается «избыточный» (по сравнению с предсказываемым теорией) рост времени релаксации, обусловленный кроссоверным характером (от среднеполевого к флуктуационному) характером поведения динамических параметров изотропной фазы вблизи фазового перехода.

В области высоких температур, где  $\xi < 3\xi_0$ , также наблюдается изменение характера температурной зависимости времени релаксации. Уменьшение радиуса корреляции приводит к тому, что температурная зависимость времени релаксации переориентации молекул на большие углы становится похожей на зависимость, характерную для не критических жидкостей, при которой изменение времени релаксации флуктуаций анизотропии с температурой определяется, в основном, изменением вязкости среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для решения поставленных задач были использованы разработанные нами экспериментальные установки и методики исследования спектров изотропного и анизотропного рассеяния света в окрестности особой точки раствора и критической точки фазового перехода в жидком кристалле. Получение достоверной информации о частотном распределении интенсивности в спектре рассеянного света обеспечивалось применением в качестве источника возбуждающего излучения стабилизированного по частоте He-Ne лазера, сферического интерферометра и высококонтрастного двухпроходного интерферометра Фабри–Перо.

2. Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование тонкой структуры спектра рассеянного света в водных растворах неэлектролитов в широком интервале температур  $t$  и концентраций  $x$ , включая особую точку неустойчивого термодинамического равновесия. Показана однозначная корреляция между характером изменения частотного смещения компонент тонкой структуры спектра и процессом перестройки структуры растворов при изменении температуры и концентрации.

3. Экспериментально установлено существование сплошной сетки водородных связей в растворах малых концентраций и определены критерии ее трехмерной целостности и границы разрушения при изменении температуры и концентрации неэлектролита в растворе. Критерием, позволяющим идентифицировать переходы между структурно-равновесными

состояниями растворов, является смена знака производной адиабатической сжимаемости по температуре  $d\beta_s/dt$  и концентрации  $d\beta_s/dx$ .

4. Экспериментально доказано существование в растворе с особой точкой нового физического явления – отрицательной дисперсии скорости гиперзвука, теоретически предсказанной Владимирским и Гинзбургом. По экспериментальному значению дисперсии и выводам теории Гинзбурга (учет пространственной дисперсии) оценен радиус корреляции структуры раствора, составляющий величину  $\sim 10$  нанометров.

5. Показано, что избыточное спектральное уширение компонент тонкой структуры спектра вблизи температуры особой точки обусловлено дополнительным механизмом увеличения коэффициента затухания гиперзвука за счет его некогерентного рассеяния на флуктуациях параметра порядка.

6. Установлено, что динамика флуктуаций параметра порядка в окрестности температуры особой точки исследованных водных растворов описывается теорией Ландау фазовых переходов второго рода с критическим индексом обобщенной восприимчивости  $\gamma=1$ . Показано, что непосредственной близости к температуре особой точки радиус корреляции флуктуаций  $\xi$  определяется степенью удаленности состояния раствора от двойной критической точки и составляет  $\sim 2-3$  нм в растворе ЗМП–вода и  $\sim 7-10$  нм в растворе ацетон–вода.

7. Экспериментально доказано существование фазового перехода «жидкость–жидкость» структурного типа в растворе 4МП–вода при температурах ниже особой точки и его проявление в температурной зависимости смещения компонент тонкой структуры спектра в окрестности точки перехода. Установлено, что динамика флуктуаций параметра порядка при фазовом переходе «жидкость–жидкость» описывается в приближении теории Ландау. Вблизи температуры фазового перехода радиус корреляции флуктуаций составляет  $\sim 5$  нм.

8. Установлено, что температурная динамика ширины спектра анизотропного рассеяния и времени релаксации флуктуаций параметра порядка при приближении к температуре фазового перехода «изотропная фаза – жидкий кристалл» описывается теорией Ландау – де Жена с критическим индексом обобщенной восприимчивости  $\gamma=1$ . По величине радиуса корреляции флуктуаций параметра порядка определен критерий применимости теории для описания динамических свойств изотропной фазы.

9. Экспериментально показано, что теория Ландау – де Жена описывает динамику флуктуаций параметра порядка в температурном интервале, где радиус корреляции флуктуаций  $\xi$  принимает значения  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0 \approx 0.6$  нм – величина порядка длины молекулы). Показано, что в непосредственной близости к температуре фазового перехода, где  $\xi > 10\xi_0$ , сужение спектра анизотропного рассеяния и избыточный рост времени релаксации обусловлен кроссоверным (от среднеполевого к флуктуационному) характером поведения динамических свойств изотропной фазы.

10. Закономерности изменения спектрального состава рассеянного света вблизи критической и особой точки жидкости – 1) сужение спектра деполаризованного рассеяния вблизи температуры фазового перехода в жидком кристалле, 2) избыточное спектральное уширение компонент тонкой структуры спектра в окрестности особой точки раствора, 3) сингулярность в температурной зависимости частотного смещения компонент тонкой структуры в окрестности фазового перехода «жидкость–жидкость» – обусловлены температурной динамикой радиуса корреляции флуктуаций параметра порядка, которая носит универсальный характер.



**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF  
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.FM/T.12.01 AT PHYSICAL-  
TECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER  
TECHNOLOGIES AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

**SEMENOV DENIS IVANOVICH**

**DYNAMICS OF ORDER PARAMETER FLUCTUATIONS  
IN LIQUIDS AND THEIR MANIFESTATION IN  
OPTICAL AND ACOUSTICAL PHENOMENA**

**01.04.05 – Optics (physical and mathematical sciences)**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Tashkent – 2016**

**The subject of the doctoral dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan with the number 28.04.2016/B2016.2.FM85**

The doctoral dissertation has been carried out at Samarkand State University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) has been posted on the web-site of the Scientific Council at [www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz) and on Information-educational portal "ZiyoNet" at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific consultant:** **Sabirov Leonard Mukhammedjanovich,**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Kahharov Abdumutalib Mamadjanovich,**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Azamatov Zakirjan Tahirovich,**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Astanov Salih Husenovich,**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:** **National University of Uzbekistan**

The defense will take place on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 at \_\_\_\_ at the meeting of the Scientific Council 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical-Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, and Samarkand State University (Address: 2b Bodomzor street, 100084, Tashkent. Phone/Fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

The doctoral dissertation can be looked through in the Information-Resource Center of the Physical-Technical Institute (registration № \_\_\_\_). (Address: 2b Bodomzor street, 100084, Tashkent. Phone/Fax: (+99871) 235-30-41).

The abstract of the dissertation is distributed on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016  
(mailing report No \_\_\_\_ dated on \_\_\_\_\_ 2016)

**S.L. Lutpullayev,**  
Chairman of the Scientific Council on Award  
of Scientific Degree of Doctor of Sciences,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**A.V. Karimov,**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degree of Doctor of Sciences,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**I.G. Atabayev,**  
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council  
on Award of Scientific Degree of Doctor of Sciences,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (Annotation of the doctoral dissertation)

**Topicality and relevance of the subject of dissertation.** According to the current development of the physics of phase transitions and cooperative processes in liquids, as well as the optics of strongly fluctuating media in the world there is an actual problem of investigation of physical processes occurring in the region of critical and special points of single-component liquids and solutions, where large-scale correlations and processes of structural formation and decay on nano-size spatial and temporal scales are manifested. Such researches are related to the establishment of peculiarities of interaction of collective freedom degrees (order parameter) with internal freedom degrees of the medium at phase transitions. The solution of this problem is of great importance for practical realization of perspective nano-technological areas in the field of modern biophysics, biochemistry and biotechnology.

Valuable information on finding out the correlative properties of liquids on nano-dimensional scales can be obtained by investigating the integral intensity, spectral width and frequency shift of fine structure components in the spectrum of Rayleigh scattering in the vicinity of critical and special points of the liquid state. The investigation of the molecular light scattering (MLS) spectra allows to obtain unique information about the structure and kinetic properties of substances, since the spectral composition of the scattered light is defined by the dynamics of fluctuations of various thermodynamic parameters of the substance under study. However, practical realization of such investigation is a complex experimental problem. Near the critical point the registration of the spectrum's fine structure is problematic due to the high level of fluctuations, which leads to a strong rise of the intensity of scattering on the frequency of the exciting light. According to this reason, investigations of the fine structure of light scattering spectrum near critical points of liquids are very rare.

The relevance of the theme of the dissertation is conditioned by the necessity of establishing the regularities of the dynamics of fluctuation and structure-forming phenomena on the scales of average molecular ordering in the vicinity of critical and special points of the liquid state, as well as of developing of a spectroscopic method for invasive (contactless) identification of thermodynamically stable and unstable states of liquids. Solution of this problem is of important meaning for development such scientific and applied directions as creating a strict theory of the molecular scattering of light in strongly fluctuating media, theory of the liquid state, and formation of materials with controlled properties.

This dissertation is devoted to solving in a certain degree the problems noted in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan DP-1442 "On the priorities of industrial development of Uzbekistan in 2011 – 2015" of 15 December, 2010, as well as in other legislation documents in this are.

**Conformity of the research to the priority directions of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.** The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and

technology of the Republic of Uzbekistan in the framework of PFI-2 program – “Physics, astronomy, power engineering and engineering industry.”

**Review of international scientific researches on the theme of the dissertation.**

In leading research centers around the world, such as the University of Maryland (USA), the University of Silesia (Poland), the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo (Japan), the Research Institute for Solid State Physics and Optics (Hungary), the Physical Institute of the Russian Academy of Sciences and Saint-Petersburg State University (Russia) and the National Universities of Kiev and Odessa (Ukraine) as well as in Samarkand State University (Uzbekistan) there are research works devoted to critical state of liquids, manifestation of large-scale correlations in integral characteristics of the scattered light, as well as in a character of high-frequency sound propagation in the vicinity of critical and special points of the liquid state.

At the global level, a number of actual problems were solved and important scientific results were obtained in this field of research: 1) common similarities in the behaviour of liquids near the critical point and in the other second-order phase transitions were experimentally identified (University of Maryland, USA); 2) the determining role of the interaction (correlation) of fluctuations in critical phenomena was set (Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia); 3) non-analytical (singular) nature of changes in the physical properties of systems near critical points was experimentally established (University of Silesia, Poland); 4) the conditions for observing the universality of critical phenomena were set forth and a hypothesis of isomorphism of critical phenomena was proposed (University of Tokyo, Japan; University of Maryland, USA).

At the present time theoretical and experimental research works are carried out to study a special point and a double critical point of a liquid, particularly in a such actual directions as studying the fine structure of a spectrum of the scattered light in aqueous solutions of non-electrolytes with special points, spectral width of the fine structure components, finding out the character of the dispersion of high-frequency sound propagation in the vicinity of the special point, revealing the relaxation and non-relaxation mechanisms of the dispersion.

**Degree of study of the problem.** The experimental study of phase transitions and critical phenomena in liquids is a vast area of actual physical problems at the moment. The theory of light scattering in the critical area of liquids was developed by L.S. Ornstein and F. Zernike. In general, in the case of 2nd-order phase transitions, such a theory was developed by V.L. Ginzburg and his colleagues on the basis of L.D. Landau theory of phase transitions. Stratified solutions represent all common properties of systems that undergo phase transitions and critical phenomena. The picture of phase transitions in different systems has many similarities (the isomorphism of critical phenomena). Therefore, the experimental study of the spectrum of light scattering near the critical stratification point provides information of a general character. This information is useful for the discussion of critical phenomena in phase transitions of different nature. Furthermore, it is essential in creating the microscopic theory of phase transitions.

Under the leadership of I.L. Fabelinski, the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, there was carried out an extensive experimental study of MLS spectra in solutions with a closed loop of stratification. New phenomena were observed in these studies, which cannot be explained by existing theories. Near the temperature of upper and lower critical points of stratification a strong increase of hypersonic absorption has been experimentally established. This fact does not agree with the coupling-mode theory M. Fixsman and K. Kawasaki, and the dynamic-scaling theory by L. Kadanoff and J. Swift. Experimentally, a large dispersion of the sound velocity below the lower point temperature and its strong dependence on temperature were found. This fact cannot be explained from the point of view of the relaxation theory by M.A. Leontovich.

Such scientists of Uzbekistan as academicians P.K. Khabibullaev, A.K. Atakhodjaev, prof. Sh. Otajonov, prof. F.H. Tukhvatullin, prof. L.M. Sabirov have carried out investigations of optical and acoustical properties of solutions. On the basis of the obtained results, peculiarities of intermolecular interactions, as well as characteristic relaxation times of various processes on molecular level have been determined for a series of binary systems. The experimental study of the fluctuation and structural phenomena near critical and special points of liquids is held in Samarkand State University under the leadership of prof. L.M. Sabirov. In these studies the methods of spectroscopy of isotropic and anisotropic scattering of light are used. The studies established a number of new physical phenomena that require explanation. Among them are the excess spectral broadening of the spectral components of the fine structure in solutions with critical and special points; a narrowing of the spectrum of anisotropic scattering near the critical point of solution stratification; anomalous frequency dependence (dispersion) of the velocity of high-frequency sound in solutions with the special point. The experimental results obtained under the leadership of I.L. Fabelinski and L.M. Sabirov have stimulated the development of the new MLS theories for critical liquids. Some mechanisms of interaction between critical and non-critical fluctuations in solutions have been proposed in the theoretical works of I.A. Chaban. The experimental study of mechanisms of interaction of various types of fluctuations and their manifestation of MSL spectra at phase transitions in liquids is the subject of intensive experimental studies of scientific schools of I.L. Fabelinski and L.M. Sabirov.

**Connection of the dissertational research with the plans of scientific-research works.** The dissertational research was carried out according to the approved plan of research works of Samarkand State University in the framework of the grant projects: F2-2.1.45 “Investigation of the dynamics of order parameter fluctuations and thermodynamic properties in the vicinity of structural and phase transitions by methods of acousto-optics and laser spectroscopy of spontaneous and stimulated light scattering in solutions and liquid crystals” (2003-2007), OT-F2-004 “Interaction of fluctuations in critical points of solutions and liquid crystals and their manifestation in optical and acoustical phenomena” (2007-2011).

**The purpose of the research** is finding out the physical mechanisms of manifestation of the dynamics of order parameter fluctuations in the spectral

distribution of light scattered in the vicinity of the critical point and special point of thermodynamically unstable state of a liquid.

To achieve the purpose the following **tasks of the research** were formulated:

to investigate the fine structure of the light scattering spectrum in aqueous solutions of non-electrolytes with the special point, depending on the concentration, temperature and scattering geometry; to find out the regularities of change in the frequency shift and spectral width of fine structure components in the vicinity of the special point of systems under study;

to determine the limits of existence of structurally stable states of aqueous solutions in “temperature-concentration” coordinates; to determine a parameter (criterion) to describe transitions between different structural states with changing temperature and concentration of non-electrolyte in the solution;

to investigate the character of high-frequency sound velocity dispersion in the vicinity of the special point; to detect the relaxation and non-relaxation mechanisms of dispersion;

to determine the mechanisms of hypersonic absorption while approaching the special point of the solution from the fine structure of the light scattering spectra;

to determine the regularities of critical dynamics of order parameter fluctuations in the vicinity of the special point of solutions;

to examine the applicability of the mean-field approximation of Landau – de Gennes theory for the description of the dynamics of order parameter fluctuations near the temperature of “isotropic liquid – liquid crystal” phase transition;

to find out the universal character of fluctuation dynamics in liquids at phase transitions of different order parameters.

**The objects of the research** are the special point of thermodynamically unstable state of aqueous solution and the critical point of the phase transition in liquid crystal.

**The subject of the research** is the dynamics of fluctuation and structure-forming processes near critical and special points of liquid, as well as their manifestation in the spectral composition of scattered laser radiation.

**The methods of the research.** In the dissertation research we used the methods of laser spectroscopy of isotropic and anisotropic light scattering, as well as the method of acousto-optic spectroscopy based on the phenomenon of light diffraction due to ultra-acoustic phonons. As an excitation radiation source we used a frequency-stabilized He-Ne laser (630 nm). In the experiment we used high-resolution spectral set-ups – a high-contrast double-pass plane Fabri-Perot interferometer and a spherical interferometer. This provides high accuracy in measurements of spectral characteristics of objects under study.

**The scientific novelty of the dissertational research** consists in the following results:

The contribution of the spatial mechanism to the dispersion of high-frequency sound velocity has been experimentally proved in the vicinity of the special point of solutions, as well as micro-heterogeneous structure of the solution below the special point temperature has been established, and the correlation radius of structural non-homogeneity  $\sim 10$  nm has been determined.

The manifestation of a process of non-coherent scattering of hypersound due to the order parameter fluctuations in the fine structure of light scattering spectra has been experimentally determined. It has been shown that the dynamics of order parameter fluctuations can be described in terms of Landau theory for 2nd-order phase transitions. The mechanism of an excess of spectral width of fine structure components in the vicinity of the solution's special point temperature has been grounded.

The "liquid-liquid" phase transition of structural type has been established in the solution below the special point temperature. It has been shown the applicability of Landau theory to describe the dynamics of order parameter fluctuations at the structural phase transition.

The physical mechanisms of narrowing of the spectra of anisotropic scattering near the temperature of "isotropic liquid – liquid crystal" phase transition have been revealed. The existence of a temperature interval has been experimentally proved, where the dynamics of change in spectral width and relaxation time of order parameter fluctuations can be described in terms of the mean-field approximation of Landau – de Gennes theory.

It has been shown that the correlation radius of order parameter fluctuations determines the limits of applicability of Landau – de Gennes theory to describe the dynamics of critical phenomena in the isotropic phase of liquid crystals. The crossover character (from the mean-field to fluctuation one) of the behaviour of dynamical properties of the isotropic phase near the temperature of phase transition has been experimentally revealed.

The universality of the dynamics of order parameter fluctuations has been experimentally revealed in the vicinity of the special point of solutions, in structural "liquid-liquid" and "isotropic liquid – liquid crystal" phase transitions.

#### **The practical results of the research.**

The diagrams of structurally stable states of aqueous solutions of non-electrolytes in "temperature-concentration" coordinates have been obtained.

The phenomenon of negative dispersion of high-frequency sound velocity in liquids has been experimentally proved.

The "liquid-liquid" phase transition has been established in the vicinity of the special point of solution.

Critical indexes of the generalized susceptibility have been determined to describe the dynamics of order parameter fluctuations for three different types of phase transitions in liquids.

**Reliability of the obtained results** is confirmed by the use of conventional scientific methods, proven techniques of experimental research and a high degree of reproducibility of experimental results. The experimental data and conclusions based on them confirm the predictions of the theoretical works by L.D. Landau, V.L. Ginsburg, P. de Gennes, M.A. Leontovich, V.V. Vladimirovsky and I.A. Chaban within the investigated problem.

**Scientific and practical value of the results of the research.** The experimental data and scientific conclusions obtained in the dissertation stimulate the development of a theory of liquid state with non-local relaxation of fluctuations

of its parameters. The non-local character of relaxation is conditioned by the interaction of fluctuations of different nature, as well as by the existence and change of the structure in the liquid. This explains the scientific value of the research results.

The application of the fine structure of MLS spectra for non-contact diagnostics of correlative properties of liquids on nano-dimensional spatial scales has been experimentally grounded in the dissertation. The obtained regularities of manifestation of large-scale correlations in liquids can serve for the development of such actual fundamental and applied fields as the development of a qualitative theory of the liquid state, and the formation of materials with controlled properties. This explains the practical value of the research results.

**Application of the research results.** In the dissertation approaches for identification of structural-equilibrium states in solution with H-bonded network and for determination of limits of existence of the continuous network have been developed and used as follows:

identified structural-equilibrium states of solutions with H-bonded network, and identified spectral lines in the fine structure of the scattered light spectrum were used in the grant 08-02-90252-Uzb\_a “Optics of phase states on the border liquid-gas, liquid-liquid, and liquid-solid” in analysis of spectral characteristics of quartz globular crystals. The research results allowed to uplift the radiation stability of optical filters with a narrow band of opacity (Letter from the Wave Research Centre of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 08.06.2015, Russia);

developed method for identification of the limits of existence of the H-bonded network in solutions was used in the grant 0108U007555 “Role of H-bonds in formation of properties of water and bio-solutions. Change of properties of H-bonded network under the influence of salts and proteins” for theoretical analysis of the clusterization processes in aqueous solutions with the special point. The research results promote the solution of the problem of a stable structure formation in aqueous solutions on nano-size spatial and temporal scales (Letter from National University, 16.02.2016, Ukraine).

**Approbation of the research results.** The main results have been reported and discussed at the following conferences: 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Cairo, Egypt, 2005); XVI Conference on Liquid Crystals (Stare Jablonki, Poland, 2005); IV Conference on Physical Electronics (Tashkent, 2005); 16th Symposium on Thermophysical Properties (Boulder, USA, 2006); III International Conference on Molecular Spectroscopy (Samarkand, 2006); International Conference on Bio-Nanotechnology (Al Ain, UAE, 2006); Republican Conference “Optical methods in modern physics” (Tashkent, 2008); “Modern physics and its perspectives” (Tashkent, 2009); “Modern problems of physics and physical education” (Samarkand, 2009); 7-th All-Russian Conference “Irreversible processes in science and technology” (Moscow, 2013); IV International Conference on Actual Problems of Condensed Matter Spectroscopy (Samarkand, 2013); II International Conference “Optics and Photonics - 2013” (Samarkand, 2013); VI International

Conference on Physical Electronics (Tashkent, 2013); 7th International Conference on Laser Probing (East Lansing, USA, 2015); at the seminar of the Faculty of Physics of Samarkand State University (04.02.2016) and at the seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degree of Doctor of Sciences 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical-Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University (30.03.2016).

**Publication of the results.** The main results of the dissertational research have been published in 20 articles in the republican (5 articles) and international (15 articles) peer-reviewed journals, as well as in the materials of the republican and international conferences (24 publications).

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references. The work contains 200 pages of main text, 62 figures and 8 tables.

## THE MAIN CONTENT OF THE DISSERTATION

In the **introduction** the topicality and relevance of the subject of the dissertation have been justified; the conformity of the research with priority directions of scientific and technological development in the republic have been defined; a review of international scientific researches on the theme of the dissertation has been presented; the degree of study of the problem, the purpose and tasks, the objects, subject and methods of investigation have been formulated; the scientific novelty of the research has been stated; the reliability of the obtained results has been proved; their theoretical and practical values have been revealed; short information about the application of the results and approbation of the work, as well as about the volume and structure of the dissertation has been given.

In the first chapter “**Spectra of molecular light scattering and some of their applications for investigation of critical and special points of liquid**” of the dissertation, there is a literature review that contains the results of theoretical and experimental studies on the spectra of molecular light scattering and some of their applications to the study of critical and special points of liquids. The change in the spectrum of molecular scattering in the region of the critical state of liquid, application of the spectra of Mandelshtam-Brillouin scattering to study the hypersonic parameters of liquids in critical state are considered. The analysis of the available data in the literature devoted to the study of the intensity and spectral composition of the scattered light due to fluctuation phenomena and structural self-organization of molecules in aqueous solutions of non-electrolytes, as well as the problem of detection and study of “liquid-liquid” phase transitions are carried out.

The second chapter “**Experimental methodology of studying the spectral composition of light scattered near the critical and special point of liquid state**” of the dissertation describes the methods for the detection and investigation of the spectra of the molecular scattering of light in relation to the assigned tasks of this work. It is known that the study of Mandelshtam-Brillouin scattering spectra in solutions with strongly developed fluctuations of concentrations is associated with a number of difficulties of an experimental character. This generally leads to a

relatively small number of researches in this area. The fact that the intensity of the central component of the Rayleigh triplet is 3-4 orders of magnitude greater than the intensity of MB components, if the latter are studied in liquids with developed order parameter fluctuations. In our experiments an observation of MB components in the vicinity of temperature of phase and structural transitions was possible by using a two-pass Fabry-Perot interferometer, which allowed us to obtain the sharpness of interference pattern  $\sim 40$  and the contrast of order  $\sim 4 \times 10^5$ .

In this chapter there is also a description of the experimental setups used in this work. The technique of accounting the form of apparatus contour in spectra of Rayleigh line wing (RLW) and MB components (MBC) is described. Errors in obtaining MB spectra related to the finite aperture of collimator lens, and errors due to inaccuracy in arrangement of light scattering angle are discussed. The technique of preparation of optically pure samples of investigated liquids is presented.

The third chapter **“Spectra of fine structure in aqueous solutions with the special point depending on temperature, concentration and scattering angle”** of the dissertation presents the results of the experimental study of spectra of fine structure of Rayleigh line in aqueous solutions of 4-methylpyridine (4MP). The special point of this system corresponds to the concentration  $x \approx 0.06$  m.f. and temperature  $t \approx 70$  °C. We studied 12 systems: 11 solutions with concentrations from 0.005 to 0.8 m.f., and pure 4MP ( $x=1$  m.f.). The spectra of the scattered light were registered in the temperature interval  $10 \div 80$  °C for scattering angles  $90$  and  $135^\circ$ . In general, we registered and analyzed more than 1800 spectra that allowed us to provide a detailed investigation of the evolution of frequency shift  $\Delta\nu$  MBCs actually in all regions of temperature and concentration that are accessible for study.

Fig.1 presents a complete set of experimental data for  $\Delta\nu(x,t)$  dependence at the scattering angle of  $90^\circ$ . With decrease of 4MP concentration in the solution  $\Delta\nu$  changes non-monotonically, passing through a maximum in the region of average concentrations (Fig.1). With rising temperature of the solution the maximum on  $\Delta\nu(x)$  dependence becomes less expressed, and its position at the concentration scale shifts towards lower concentration. The position of the maximum on  $\Delta\nu(x)$  dependencies, according to the concentration, does not depend on the scattering angle, but it is determined only by the solution temperature.

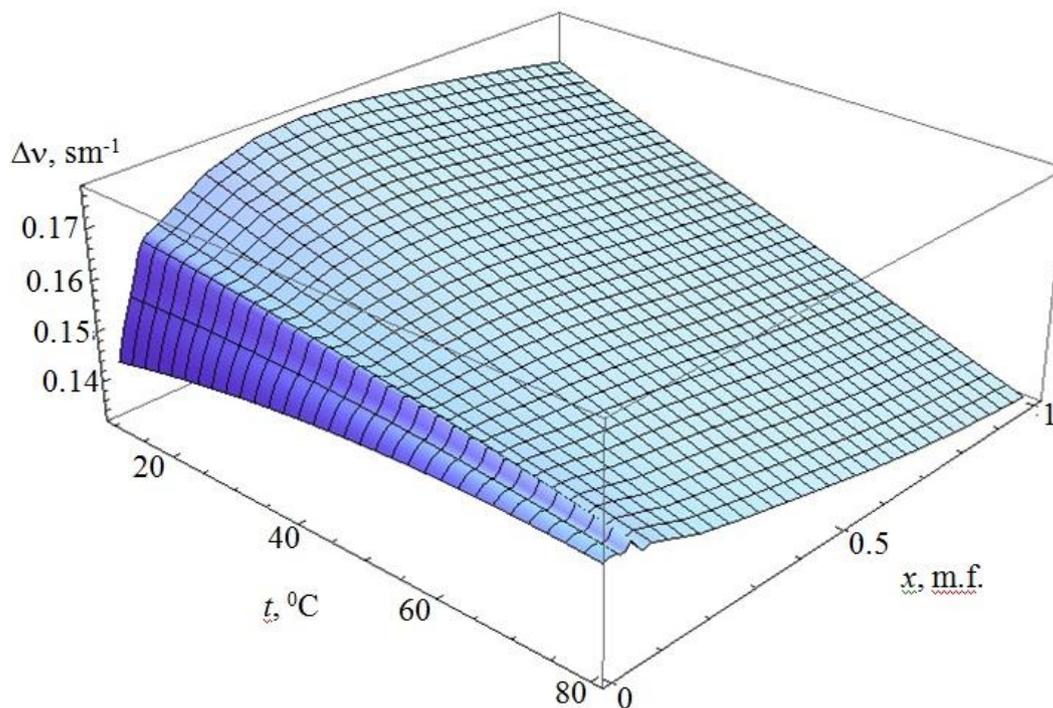
In solutions of low concentrations there is an additional maximum on isotherms of  $\Delta\nu(x)$  dependence (Fig.1). The position of this maximum on the scale of concentration does not depend on the temperature of solutions. With rising scattering angle the maximum slightly shifts towards the lower concentration.

In the concentration region  $x \geq 0.4$  m.f. the temperature coefficient of MBC shift (a derivative of  $\Delta\nu(t)$  by  $t$  when  $x=\text{const}$ ) is negative, and it does not depend on the temperature and concentration of solution.

In the region  $0.1 \leq x < 0.4$  m.f. the temperature coefficient of MBCs shift is also negative and does not depend on the solution temperature, but becomes dependent on the solution concentration. With decreasing  $x$  the temperature coefficient

decreases (by the absolute value). At concentrations  $x < 0.1$  m.f. the temperature coefficient depends both on the solution concentration and temperature. At this, an inversion of the sign of the temperature coefficient of MBCs shift is observed. The inversion point with decreasing  $x$  is shifted towards higher temperatures.

The revealed in the experiment regularities of change of MBCs shift with temperature and concentration reflect the change of the thermodynamic state of aqueous solutions of 4MP. The change of the solution state can be identified by the change of one of the following parameters: 1) the sign of the derivative of MBCs shift by concentration ( $d(\Delta\nu)/dx$ ), and 2) the sign of the derivative of MBCs shift by temperature ( $d(\Delta\nu)/dt$ ).



Scattering angle is  $90^{\circ}$

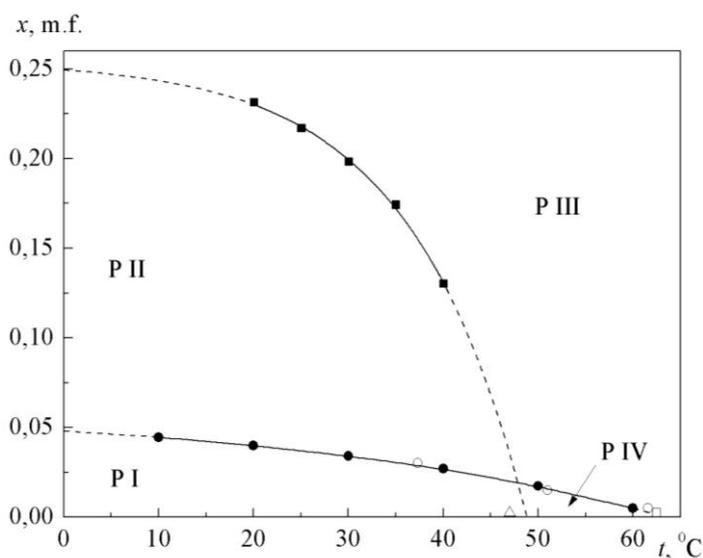
**Fig.1. Concentration-temperature dependence of MBC shift in 4MP aqueous solutions.**

There are no any chemical reactions in the studied solutions with variation of temperature and concentration. Accordingly, different states of solutions are caused by the structural changes in them. A transition from one structure to another can be realized by variation of concentration (at a fixed temperature) or by variation of temperature (at a fixed concentration).

In order to determine the boundaries of existence of areas with different structures (lines of structural transitions), we carried out an investigation of the adiabatic compressibility of solutions – a thermodynamic parameter, which is closely related to the structure of liquids. The compressibility is one of the parameters, which are related to the structure of liquids, and determination of this parameter, as well as its derivatives (excess molar adiabatic compressibility, partial adiabatic compressibility) is a known method of study of the structure of solutions.

Investigations of the adiabatic compressibility of liquids  $\beta_S=1/(\rho V^2)$  ( $\rho$  - density,  $V$  – sound velocity) by measuring the ultrasonic velocity are rather numerous. However, experimental data on the compressibility of aqueous solutions at higher frequencies (hypersound) are practically absent.

With decreasing concentration of 4MP in solutions the magnitude of  $\beta_S$  changes non-monotonically, passing through a minimum in the region of average concentrations (an inversion of the sign of the derivative of  $\beta_S(x)$  by  $x$  at  $t=\text{const}$ ). With rising temperature the minimum on  $\beta_S(x)$  dependence becomes lesser expressed, and its position by the concentration scale shifts towards lower concentrations. The position of the minimum on  $\beta_S(x)$  dependence does not depend on the frequency (wave length) of sound when there is a transition from ultrasound to hypersound, but it is determined by the temperature of solutions.



- PI:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt < 0$
- PII:  $d\beta_S/dx < 0, d\beta_S/dt > 0$
- PIII:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt > 0$
- PIV:  $d\beta_S/dx > 0, d\beta_S/dt < 0$
- -  $d\beta_S/dx=0, \bullet$  -  $d\beta_S/dt=0$

**Fig.2. The state diagram (according to regularities of change in  $\beta_S$  magnitude) of 4MP aqueous solutions in coordinates “temperature-concentration”.**

In solutions of low concentrations ( $x < 0.1$  m.f.)  $\beta_S(t)$  cannot be described by a simple linear dependence. With rising temperature the compressibility of the solution decreases, passes through a minimum, and then increases with further rise of the solution temperature. The temperature coefficient of the compressibility (derivative of  $\beta_S(t)$  by  $t$  at  $x=\text{const}$ ) depends on both concentration of the solution and its temperature. There is an inversion of the sign of the temperature coefficient of the compressibility; at this the point (temperature) of the inversion is shifted towards higher temperatures with decreasing  $x$ .

On isotherms of  $\beta_S(x)$  in the region of low concentrations there is an additional minimum. At ultrasonic frequency there is no minimum in this range of concentrations.

The lines, which are formed by the inversion points of the sign of  $\beta_S$  derivatives by concentration and temperature, reflect the lines of structural transitions between different states of solutions (Fig.2). The transition from one state to another can be realized either by the variation of the solution concentration (at a fixed temperature), or by the variation of the solution temperature (at a fixed concentration).

On the constructed on the basis of our results diagram of the state of solutions in coordinates “temperature-concentration” (Fig.2) we revealed four regions (phases), which are characterized by different structures of the system:

1) in  $t$ - $x$ -region, where  $d\beta_S/dx < 0$ ,  $d\beta_S/dt < 0$  (P I), a continuous network of H-bonds is preserved, which is formed by water molecules with a tetrahedral configuration similar to pure water structure;

2) in  $t$ - $x$ -region, where  $d\beta_S/dx < 0$ ,  $d\beta_S/dt > 0$  (P II), the network of H-bonds preserves its three-dimensional integrity, but it is disturbed (deformed) by implanted non-electrolyte molecules and rising number of thermal defects;

3) in  $t$ - $x$ -region, where  $d\beta_S/dx > 0$ ,  $d\beta_S/dt > 0$  (P III), the network of H-bonds is destroyed (fragmented) in the whole volume of the solution, and the degree of the network fragmentation increases with the rise of temperature or non-electrolyte concentration in the solution;

4) at low concentration of 4MP there is  $t$ - $x$ -region in the solution, where  $d\beta_S/dx > 0$ ,  $d\beta_S/dt < 0$  (P IV). In this rather small temperature-concentration region, the continuous network of H-bonds is absent in the solution, but the solution structure locally preserves features of the structure of pure water.

The obtained data on the adiabatic compressibility of solutions in the hypersonic frequency region prove the existence of the continuous network of hydrogen bonds in pure water and aqueous solutions at a certain interval of temperature and concentration, as well as the transformation of this network from a non-deformed to deformed state with further destruction (fragmentation) with increasing temperature or concentration of non-electrolyte in the solution.

At the concentration of the special point  $x=0.06$  m.f. (minimum of thermodynamic stability) in the solution we experimentally observed the additional minimum of the compressibility on the hypersonic frequency. The minimum is absent on the ultrasonic frequency that points on manifestation in the solution of structure-forming processes on nano-dimensional scales (for ultrasound, due to relatively large wavelength, the medium is still continuous one). The characteristic scale of the structural non-homogeneity of the solution, which is estimated by the magnitude of the minimum of the adiabatic compressibility, is of 10 nm.

In the fourth chapter “**Hypersonic propagation in aqueous solutions of non-electrolytes in the vicinity of the special point**” of the dissertation, we presented the results of the investigation of the acoustic properties of aqueous solutions in the hypersonic region from the fine structure of the scattered light spectra. The magnitudes of the dispersion  $D$  in the hypersonic region for 4MP-water solutions were determined by a new method, which is based on the calculation of the dispersion directly from the magnitudes of the shift  $\Delta v$  of MBCs, registered at different scattering angles  $\theta$ :

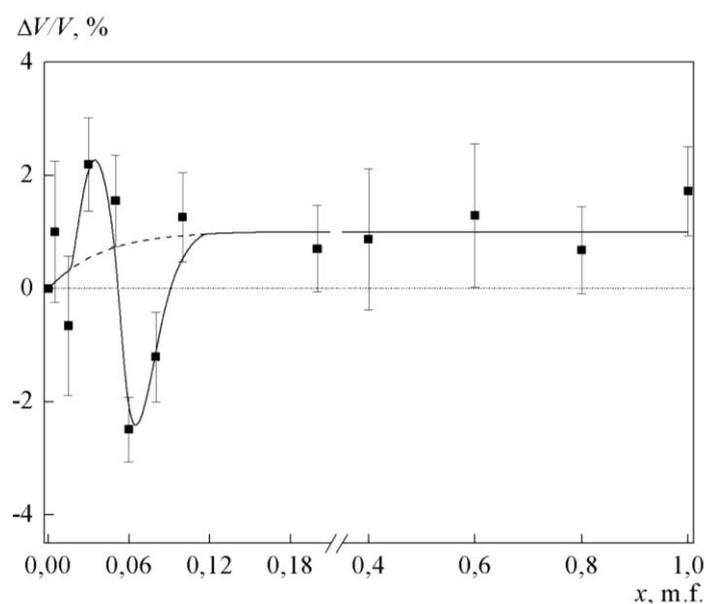
$$D = 2 \times \left( \frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} - \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right) \times \left( \frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} + \frac{\sin(\theta_1/2)}{\sin(\theta_2/2)} \right)^{-1} .$$

The advantage of the proposed method, as compared with the traditional comparison of sound velocities measured for different frequencies, is in the fact that the magnitude  $D$  can be calculated just from the magnitudes of MBCs shift.

Therefore, there is no necessity to calculate absolute magnitudes of hypersonic velocity, which require additional measurements of the refractive index  $n$  of the studied liquid.

When transition from the sound frequency  $\sim 4.8$  GHz to  $\sim 6.2$  GHz we discovered an unusual physical phenomenon – a negative dispersion (decrease of the hypersonic velocity with rise of the frequency) in a narrow interval of the solution concentrations ( $0.06 \div 0.08$  m.f.) in the vicinity of the special point (Fig.3). The magnitude of the dispersion is practically independent on the solution temperature.

In order to have a complete picture of the dispersion, the solution with concentration  $x=0.06$  m.f. was subjected to a special study. In this solution we carried out a detailed investigation of the temperature dependencies of sound velocity for frequencies 5.4 MHz, 2.6 GHz, 4.8 GHz and 6.2 GHz.



Solid line – fitting of the experimental data. Dashed line – regular magnitudes of the dispersion in the concentration region  $x < 0.1$  m.f.

**Fig.3. Concentration dependence of the hypersonic velocity dispersion in 4MP aqueous solutions at the temperature of 20 °C.**

In the frequency region from 5.4 MHz to 4.8 GHz in the solution we observed a positive dispersion of the sound velocity. The analysis of the obtained data in the framework of the relaxation theory shows that the positive dispersion is caused by the process of the bulk viscosity relaxation, and the characteristic time of the process varies from  $\tau=9.3 \times 10^{-11}$  s to  $\tau=7.7 \times 10^{-11}$  s when temperature is varied, respectively, from 30 to 50 °C. The magnitudes of ultrasound and hypersonic velocities at frequencies 5.4 MHz and 4.8 GHz are close to the boundary velocities  $V_0$  and  $V_\infty$  of the relaxation process.

Experimental observation of the negative dispersion of the sound velocity in the investigated solutions is essential and can be explained by the micro-heterogeneous structure of solution below the special point temperature. Conditions of manifestations of the negative dispersion in liquids were discussed in the theoretical works by Vladimirsky and Ginzburg. Estimated, in accordance with their predictions, characteristic size of a spatial non-homogeneity in the investigated solution is of the order of 10-13 nm, and it is practically independent of the solution temperature. The latter indicates that the ordered regions are not the

fluctuation occurring formations, but represent an element of the internal structure of the solution. Consequently, in solutions at temperatures below the special point, temperature ordered regions are formed with a structure different from the structure of the whole solution. In other words, in solutions with the special point there should be a phase transition of structural type, which temperature coincides with the special point temperature.

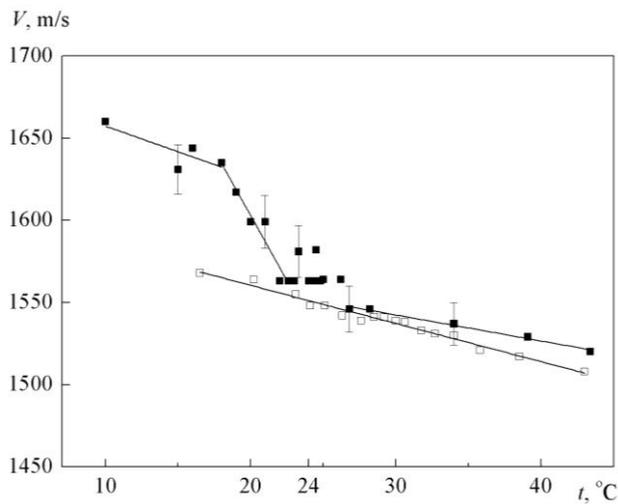
To test this hypothesis, we proposed an adequate method for the detection and investigation of the structural phase transitions in liquids. This method is the study of the temperature coefficients of the hypersonic velocity and absorption coefficient of hypersound from spectra of Mandelshtam-Brillouin scattering. In this, we subjected to study a series of solutions with the special point, as well as a solution in which there is no special point, but there are a number of anomalies in the behaviour of the physical parameters at low concentrations (a solution with a special line). We investigated the temperature dependence of the velocity and absorption coefficient of hypersound from spectra of Mandelshtam-Brillouin scattering in solutions with the special point (4-methylpyridine-water, 3-methylpyridine-water, acetone-water), as well as in the solution with the special line – tert-butyl-alcohol-water (TBA) with concentration  $x=0.04$  m.f. This concentration corresponds to so-called anomalous maximum of the light scattering intensity in concentration dependence of aqueous TBA solutions. The origin of this maximum is still a subject of discussion in scientific literature.

Our experiment shows that the temperature dependence of the hypersonic velocity  $V(t)$  in TBA-water solutions can be described by two linear parts with different magnitudes of the temperature coefficient of the velocity  $B=dV/dt$ . A transition by temperature between the dependencies  $V(t)$  with different  $B$  occurs in a narrow temperature interval ( $\sim 43-44$  °C), and it is accompanied by a jump-like change of the hypersonic velocity at the boundaries of this interval. Previously, we observed the change of the temperature coefficient of the hypersonic velocity at  $\sim 10$  °C in the solution with concentration 0.19 m.f. (this concentration corresponds to the maximum of the scattered light intensity due to the concentration fluctuations). The change in the temperature coefficient of the hypersonic velocity points to the fact that one and the same system (TBA-water solution) is described by different state equations in the regions with different magnitudes of  $dV/dt$ .

In our work it was established that for aqueous solutions of TBA  $t-x$  coordinates of minimums of the correlation length of the concentration fluctuations, change of  $dV/dt$  of hypersound, and maxima on  $V(x)$  isotherms are coincident. Our results together with the literary data are in accordance with theoretical predictions about the existence of unattainable upper and lower critical points of stratification. The transition from the high-temperature pre-critical region to the low-temperature one is accompanied by a structural phase transition. By comparing our results with the results of temperature-concentration study of the correlation radius of the concentration fluctuations and hypersonic velocities at different frequencies we constructed the state diagram of aqueous solutions of TBA, i.e. the lines of transitions (by temperature and concentration) between different structures of the solutions.

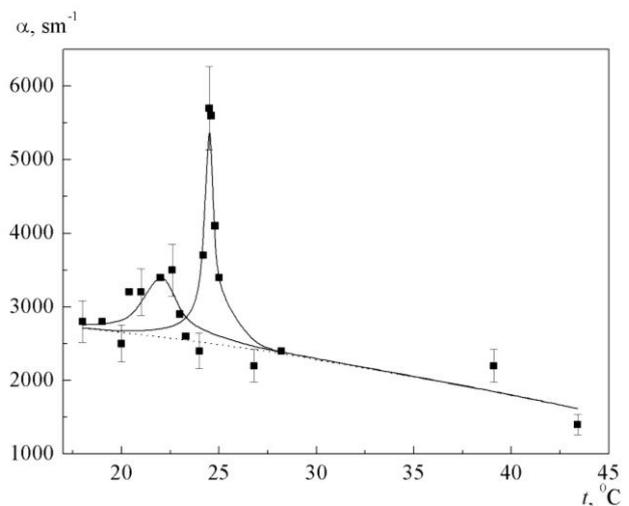
In acetone-water solution (temperature and concentration of the special point, consequently, 0.4 m.f. and  $\sim 24^\circ\text{C}$ ) we studied temperature dependencies of the ultrasonic (30.3 MHz) and hypersonic ( $\sim 2.6$  GHz) velocities, as well as the absorption coefficient in the vicinity of the special point temperature (Fig. 4 and 5).

At temperatures above the special point (SP) in the solution the hypersound and ultrasound velocities linearly depend on temperature. The dispersion of sound velocity does not exceed the experimental error. The temperature coefficients ( $dV/dt$ ) of ultrasonic and hypersonic velocities are equal. In a narrow temperature interval in the vicinity of SP the hypersonic velocity does not depend on temperature ( $dV/dt=0$ ). At temperatures below SP we can see two intervals, in which the hypersonic velocity depends linearly on temperature, but with different temperature coefficients. The temperature coefficient of the hypersonic velocity at  $t \leq 18^\circ\text{C}$  is approximately equal to the temperature coefficient of the ultrasonic velocity.



Solid line – smooth of the experimental data.

**Fig.4. Temperature dependence of ultrasonic ( $\square$ ) and hypersonic ( $\blacksquare$ ) velocity in acetone-water solution**



Solid lines – theoretical calculation, dashed line – background (non-critical) part of absorption.

**Fig.5. Temperature dependence of the absorption coefficient of hypersound in acetone-water solution**

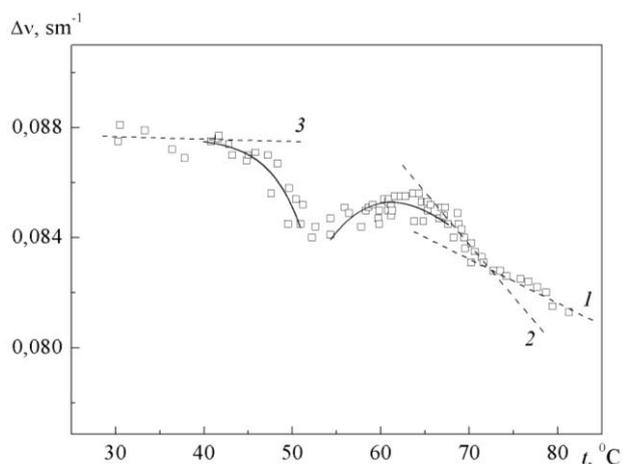
With changing temperature of the solution the hypersound absorption coefficient  $\alpha$  is changed non-monotonically, and in  $\alpha(t)$  dependence one can clearly observe two maxima (Fig.5). The first, relatively intensive, and narrow maximum is located at the special point temperature. The second, less intensive, and wider maximum is located at the temperature, which is approximately  $2^\circ\text{C}$  lower.

The temperature dependence of the excessive part of absorption in the vicinity of SP temperature looks like  $\lambda$ -curve that contradicts the classical theories of sound absorption near the critical point. In the case of hypersound, the product of frequency of the time of fluctuation relaxation  $\Omega\tau \gg 1$  and the theories predict a decrease of critical contribution to the absorption. However, in the experiment we observed the rise of the critical part of the absorption.

In the present work we described the observed excess of absorption in terms of a modern theory developed by I.A. Chaban (JETP, 2005, v.127, No2, p.1). The

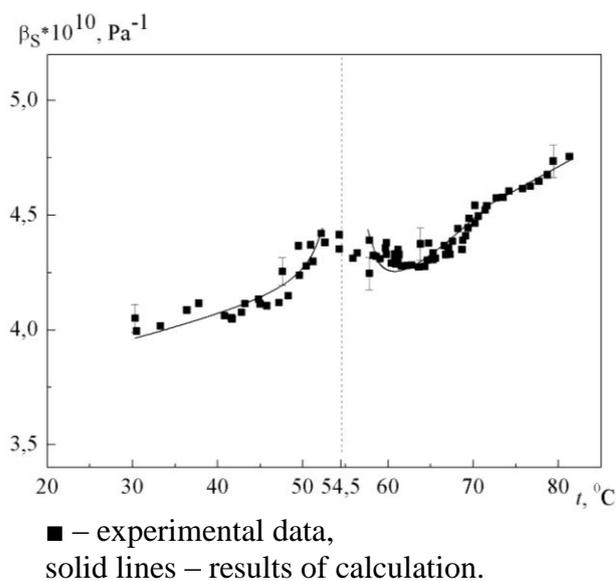
theory is based on the assumption that in the vicinity of the critical point the rise of the hypersonic absorption occurs also due to the sound scattering on the order parameter fluctuations.

For ultrasonic frequencies such a contribution to the absorption is absent since the wavelength of ultrasound is significantly larger than the correlation radius of fluctuations. A principal moment of the theory is a choice of the magnitude of the critical index  $\gamma$  of the summarized susceptibility, which determines the temperature dependence of the critical part of the absorption near the special point. In our study we did not do any initial assumptions about the magnitude of  $\gamma$ , and the critical index was determined by minimizing the sum of average squared deviations of the experimental data from the curve calculated by the formulas of the theory.



Dashed lines (1, 2 and 3) - linear parts of the dependence  $\Delta v(t)$ . Solid lines - temperature intervals where  $\Delta v(t)$  is of non-linear character.

**Fig.6. Temperature dependence of MBCs shift  $\Delta v$  in 4MP-water solution with concentration 0.06 m.f. (scatter angle  $45^\circ$ )**



■ - experimental data,  
solid lines - results of calculation.

**Fig.7. Temperature dependence of the adiabatic compressibility  $\beta_s$  in 4MP-water solution ( $x=0.06$  m.f.)**

It was found that the best agreement between the experiment and the theory takes place when  $\gamma=1$ . The obtained result shows that the critical dynamics of fluctuations in the vicinity of SP can be described in terms of Landau theory. The theory is able to describe also the second maximum in temperature dependence of  $\alpha$  below SP temperature. This result still requires its own interpretation.

We should note that we observed the similar behaviour of the hypersonic velocity and absorption also in aqueous solutions of 3MP and 4MP in the vicinity of the special point temperature. In these systems the theory of I.A. Chaban with critical index following from the Landau theory can better describe the observed in the experiment maxima of the excess of the hypersonic absorption.

Unlike acetone-water and 3-methylpyridine-water solutions, the additional (low-temperature) maximum of absorption is weakly expressed (in limits of experimental errors) in 4-methylpyridine-water solution that can be explained by relatively high non-critical (background) absorption (as compared with other

studied solutions). However, the temperature behaviour of MBCs shift in the temperature interval 40÷65 °C is similar to the peculiarities of change of the sound velocity while approaching the critical point of the second order phase transition (Fig.6).

We studied the adiabatic compressibility  $\beta_s$  of the solution in the temperature interval from ~30 to ~80 °C. Fig.7 presents magnitudes of  $\beta_s$  for different temperatures of the solution determined from the magnitudes of MBCs shifts. In the analysis of singular (critical) parts of  $\beta_s$  we initially made no assumptions about the magnitude of the critical index  $\gamma$ . The temperature of the phase transition  $T_C$  was varied in limits 53÷55 °C in order to find such a magnitude, at which the critical indexes become equal for the singular parts of  $\beta_s$  below and above  $T_C$ .

As a result, we obtained the following parameters:  $T_C \approx 54.5$  °C,  $\gamma_1 = -1.08 \pm 0.07$ ,  $\gamma_2 = -1.06 \pm 0.12$ . The calculated magnitudes of the adiabatic compressibility can better describe the results obtained in the experiment (Fig.7). The singularity of the behaviour of the adiabatic compressibility while approaching the temperature ~54.5 °C can be described by the critical index, which coincides with the predictions of Landau theory for the 2nd-order phase transitions.

The presence of two maxima of the hypersonic absorption, the singularity of the behaviour of the adiabatic compressibility, as well as their consistent description in terms of the theory can prove the existence in the studied solutions of two different states with minimum of the thermodynamic stability, which are spaced by temperature.

In the vicinity of SP temperature the system is characterized by rather high level of the order parameter fluctuations (concentration fluctuations in the case of SP of the solution) due to the maximal closeness to DCP. Since DCP is unattainable, there is the “cutoff” of the scale of fluctuations (the correlation radius), and their dynamics can be described by the critical index of Landau theory. At lower temperature the system is also thermodynamically unstable, but due to the structural phase transition. The order parameter fluctuations in this case are fluctuations in the concentration of “holes” (i.e., regions, where structure is absent). The dynamics of the hole concentration fluctuations (the order parameter at structural phase transition) is also described by the critical index of Landau theory.

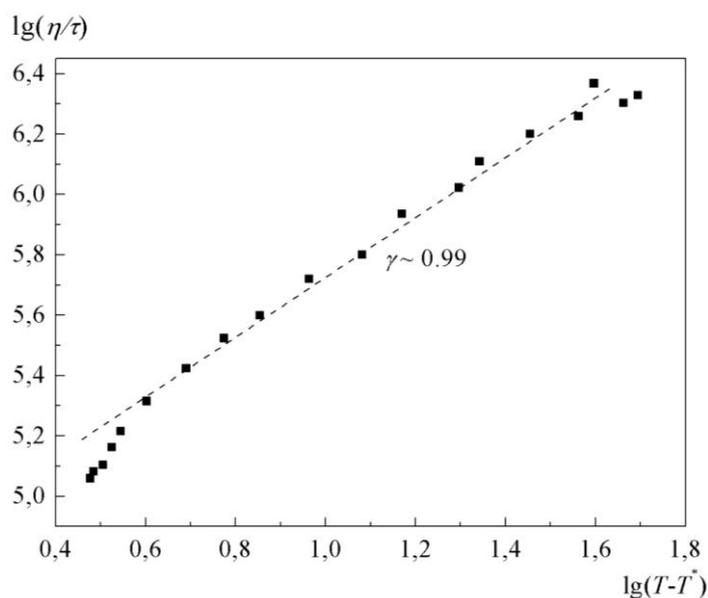
In the fifth chapter **“Spectra of anisotropic scattering of laser radiation near the temperature of phase transition in liquid crystals”** of the dissertation, we presented the results of the study of spectra of depolarized light scattering (Rayleigh line wing) in the isotropic phase of liquid crystals while approaching the temperature of “isotropic – liquid crystal” (I-LC) phase transition. We studied the angular and temperature kinetics of the width of Rayleigh line wing (RLW).

The analysis of the obtained results shows a sharp narrowing of RLW spectrum while approaching the temperature of I-LC phase transition (at the side of the isotropic phase). The contour of the line of scattering is described by a single Lorentzian, the width of which is strongly dependent on the proximity of the phase transition temperature, and is independent (in the limits of experimental errors) on the angle of scattering.

The narrowing of the wing near the temperature of I-LC transition is conditioned by the critical slowdown of the orientational mobility of molecules due to the rise of the correlation radius of the order parameter fluctuations in the vicinity of I-LC phase transition.

From the obtained RLW spectra we determined the temperature dependencies of the relaxation time  $\tau$  of the order parameter fluctuations in the studied samples of MBBA and PAA liquid crystals. It was shown that while approaching I-LC transition temperature, the rise of the relaxation time is caused by the rise of the correlation radius of fluctuations, as well as by the rise of the viscosity  $\eta$  of the isotropic phase.

The analysis of the experimental results, without accounting the temperature dependent contribution of the viscosity, gives an overvalued magnitude of the critical index of susceptibility, and, consequently, does not allow one to determine authentically the limits of applicability of the Landau – de Gennes theory for the description of the phenomenon.



Dashed line – a linear part of the dependence,  $\gamma$  – susceptibility critical index,  $T^*$  – temperature of the second order phase transition.

**Fig.8. Dependence of  $\lg(\eta/\tau)$  on  $\lg(T-T^*)$  in the isotropic phase of PAA liquid crystal.**

In the isotropic phase of liquid crystals it is possible to distinguish three temperature intervals, in which the relaxation time of the order parameter fluctuations depends differently on temperature (Fig.8). In the temperature interval where the correlation radius  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0 \approx 0.6$  nm is of order the length of the molecule), the temperature dependence of the relaxation time is described in terms of Landau – de Gennes theory with the critical index of the susceptibility  $\gamma=1$ .

Near I-LC transition temperature where  $\xi > 10\xi_0$ , we observe an “excessive” (as compared with theoretical prediction) rise of the relaxation time, which is conditioned by the crossover character (from mean-field to fluctuation) of behaviour of the dynamic parameters of the isotropic phase in the very vicinity of the phase transition.

In the region of high temperatures where  $\xi < 3\xi_0$ , we also observe a change in the character of the temperature dependence of the relaxation time. The decrease of the correlation radius leads to the fact that the temperature dependence of the

relaxation time, which characterizes the large-angle reorientation of molecules, becomes similar to that of non-critical liquids, where the change in the time of the anisotropy fluctuation with changing temperature is determined mainly by the change of the viscosity of liquids.

## CONCLUSION

1. In order to solve the stated tasks, we used experimental setups and methods of study of the spectra of isotropic and anisotropic light scattering developed by us for researches in the vicinity of the special point of solutions and near the critical point of the phase transition in the liquid crystal. Reliable information on frequency distribution of the intensity in the scattered light spectrum was provided by using the frequency stabilized He-Ne laser, the high-contrast double-pass plane Fabry-Perot interferometer, and the spherical interferometer.

2. For the first time we carried out a complex experimental investigation of the fine structure of light scattering spectrum in aqueous solutions with the special point in a wide range of temperatures  $t$  and concentrations  $x$ . A correlation was revealed between the character of changing the spectrum's fine structure and structural reconstructions in solutions with changing temperature and concentration.

3. The existence of a continuous network of H-bonds was experimentally proved in solutions of low concentration. The parameter (criterion) of its three-dimensional integrity was determined, and the limits of its destruction with changing temperature and concentration of non-electrolyte in the solution were defined. A change of the sign of the adiabatic compressibility derivative by temperature  $d\beta_s/dt$  and concentration  $d\beta_s/dx$  is the criterion, which allows to identify transitions between structurally stable states of solutions.

4. A new physical phenomenon – the negative dispersion of the hypersonic velocity – was experimentally proved in the solution with the special point. The possibility of the negative dispersion in liquids has been theoretically predicted by Vladimirskiy and Ginzburg. By the experimental magnitude of the dispersion and conclusion of Ginzburg theory (accounting the spatial contribution to the dispersion) we estimated the correlation radius of the solution's structure, which was found to be  $\sim 10$  nm;

5. It was shown that an excess of spectral width of the fine structure components of the spectrum near the special point temperature is conditioned by the additional mechanism of hypersonic attenuation due to its non-coherent scattering on order parameter fluctuations.

6. It was established that the dynamics of order parameter fluctuations in the vicinity of the special point temperature of the studied solutions can be described by Landau theory of 2nd-order phase transitions with the critical index of the generalized susceptibility  $\gamma=1$ . Near the special point temperature the correlation radius of fluctuations  $\xi$  is determined by the degree of proximity to the double critical point, and it is  $\sim 2-3$  nm in 3MP-water solution, and  $\sim 7-10$  nm in acetone-water solution.

7. The “liquid-liquid” phase transition of structural type was experimentally proved in 4MP-water solution below the special point temperature, as well as manifestation of this transition in temperature dependence of the frequency shift of the fine structure components of light scattering spectra in the vicinity of the point of transition. It was established that the dynamics of order parameter fluctuations in “liquid-liquid” phase transition is described by Landau theory. Near the temperature of the structural phase transition the correlation radius of fluctuations is  $\sim 5$  nm.

8. It was established that while approaching the temperature of “isotropic liquid – liquid crystal” phase transitions, the dynamics of the narrowing of the spectrum of anisotropic light scattering and the rise of the relaxation time of order parameter fluctuations can be described by Landau – de Gennes theory with the critical index of the generalized susceptibility  $\gamma=1$ . It was shown that the correlation radius of order parameter fluctuations determines the limits of the theory applicability to describe the dynamical properties of the isotropic phase.

9. It was experimentally shown that Landau – de Gennes theory describes the dynamics of order parameter fluctuations in the temperature interval, where the correlation radius of fluctuations  $\xi$  is  $3\xi_0 \leq \xi \leq 10\xi_0$  ( $\xi_0 \approx 0.6$  nm is about the length of the molecule). In the very vicinity of the phase transition temperature, where  $\xi > 10\xi_0$ , the narrowing of the anisotropic light scattering spectrum and the excessive rise of the relaxation time is conditioned by the crossover (from mean-field to fluctuation) character of the behaviour of dynamical properties of the isotropic phase.

10. It was shown that the regularities of changing the spectral composition of the scattered light near the critical and special points – 1) narrowing of the spectrum of the anisotropic light scattering near the temperature of the phase transition in liquid crystals, 2) excessive spectral broadening of the fine structure components in the vicinity of the solution’s special point, 3) singularity of the temperature dependence of the frequency shift of fine structure components in the vicinity of “liquid-liquid” phase transition – are conditioned by the dynamics of the correlation radius of order parameter fluctuations, which is of the universal character.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; Part I)**

1. Sabirov L.M., Semenov D.I. Induced birefringence and determination of the time of orientational relaxation of molecules in the isotropic phase of liquid crystals // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. Allerton Press, New York, 2005. – Vol. 12, – PP. 14–21 (No 40. ResearchGate; IF = 0.246).

2. Sabirov L.M., Semenov D.I. Induced birefringence in the isotropic phase of cholesteric liquid crystals // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2006. – Vol. 101, – No 2. – PP. 299–302 (No 40. ResearchGate; IF = 0.72).

3. Sabirov L.M., Semenov D.I. Depolarized light scattering spectra of the isotropic phase of nematic liquid crystals // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2006. – Vol. 100, – No 6. – PP. 877–880 (No 40. ResearchGate; IF = 0.72).

4. Sabirov L.M., Semenov D.I. Propagation of hypersound and acoustic relaxation in the isotropic phase of cholesteryl myristate // Acoustical Physics. Pleiades Publishing, New York, 2006. – Vol. 52, – No 2. – PP. 207–210 (No 40. ResearchGate; IF = 0.88).

5. Sabirov L.M., Semenov D.I. Spectroscopic and acousto-optic studies of relaxation processes in isotropic phase of liquid crystals // Physics of Wave Phenomena. Allerton Press, New York, 2006. – Vol. 14, – No 3. – PP. 1–29 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39).

6. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Temperature and concentration dependences of the frequency shift of the Rayleigh line fine-structure components in aqueous solutions of  $\gamma$ -picoline // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2007. – Vol. 103, – No 3. – PP. 490–495 (No 40. ResearchGate; IF = 0.72).

7. Sabirov L.M., Semenov D.I., Khaidarov Kh.S. Mandelshtam–Brillouin scattering spectra of aqueous solutions of  $\gamma$ -picoline and manifestation of a phase transition of the structural type in these spectra at low concentrations of  $\gamma$ -picoline // Optics and Spectroscopy. Pleiades Publishing, New York, 2008. – Vol. 105, – No 3. – PP. 369–376 (No 40. ResearchGate; IF = 0.72).

8. Саби́ров Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Особенности поведения частотного смещения компонент тонкой структуры рэлеевского рассеяния света в водном растворе  $\gamma$ -пиколина при различных концентрациях // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2009. – Том 11, – № 3. – С. 219–223 (01.00.00; № 5).

9. Саби́ров Л.М., Семенов Д.И. Характер предпереходного поведения времени релаксации флуктуаций параметра порядка в изотропной фазе нематического жидкого кристалла МБА // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2009. – Том 11, – № 3. – С. 66–70 (01.00.00; № 5).

10. Bunkin N.F., Gorelik V.S., Sabirov L.M., Semenov D.I. Influence of local molecular ordering on the temperature behavior of the relaxation time of order-parameter fluctuations in the isotropic phase of PAA nematic liquid crystal // *Physics of Wave Phenomena*. Allerton Press, New York, 2009. – Vol. 17, – No 1. – PP. 1–11 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39).

11. Semenov D.I. Adiabatic compressibility of the 4-methylpyridin-water solution as a function of the temperature, concentration, and sound frequency // *Physics of Wave Phenomena*. Allerton Press, New York, 2010. – Vol. 18, – No 3. – PP. 155–158 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39).

12. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Dispersion of the high-frequency sound velocity in the aqueous solution of 4-methylpyridine // *Physics of Wave Phenomena*. Allerton Press, New York, 2010. – Vol. 18, – No 3. – PP. 159–163 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39)

13. Bunkin N.F., Gorelik V.S., Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Frequency shift of Rayleigh line fine structure components in a water solution of 4-methylpyridine as a function of temperature, concentration, and light scattering angle // *Quantum Electronics*. Turpion Ltd., London, 2010. – Vol. 40, – No 9. – pp. 817–821 (No 40. ResearchGate; IF = 0.9).

14. Саби́ров Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С., Утарова Т.М. Влияние гетерофункциональности молекул неэлектролита на температурную зависимость скорости распространения гиперзвука в водных растворах // *Узбекский физический журнал*. Ташкент, 2011. – Том 13, № 6. – С. 434–441 (01.00.00; № 5).

15. Саби́ров Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С., Исмаилов Ф.Р., Утарова Т.М. Температурные и концентрационные зависимости скорости гиперзвука в водных растворах 4-метилпиридина // *Узбекский физический журнал*. Ташкент, 2011. – Том 13, – № 4. – С. 294–302 (01.00.00; № 5).

16. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Concentration dependence of the hypersonic velocity dispersion in aqueous solutions of 4-methylpyridine // *Physics of Wave Phenomena*. Allerton Press, New York, 2011. – Vol. 19, – No 3. – PP. 184–188 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39).

17. Sabirov L.M., Semenov D.I., Utarova T.M., Haidarov H.S. Some features of the temperature dependence of the hypersonic velocity in an aqueous solution of tertiary butyl alcohol // *Physics of Wave Phenomena*. Allerton Press, New York, 2011. – Vol. 19, – No 3. – PP. 177–183 (No 40. ResearchGate; IF = 0.39).

18. Саби́ров Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Экспериментальное наблюдение фазового перехода «жидкость–жидкость»: Тонкая структура спектра рэлеевского рассеяния света в водных растворах неэлектролита // *Узбекский физический журнал*. Ташкент, 2014. – Том 16, – № 2. – С. 138–143 (01.00.00; № 5).

19. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Negative dispersion of high-frequency sound velocity in aqueous solutions of non-electrolyte in the vicinity of the singular point concentration // *Украинский физический журнал*. Киев, 2015. – Том 60, – № 9. – С. 872–875 (01.00.00; № 51).

20. Sabirov L.M., Semenov D.I. Different structural states of 4-methylpyridine-water solutions: Experimental study of the adiabatic compressibility at the hypersonic frequency // Украинский физический журнал. Киев, 2015. – Том 60, – № 9. – С. 868–871 (01.00.00; № 51).

## II бўлим (II часть; Part II)

21. Сабилов Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х. Лазерная спектроскопия тонкой структуры рассеяния света в водном растворе  $\gamma$ -пиколина при различных концентрациях // IV Конференция по физической электронике. – 2005. Ноябрь. 2–4. Ташкент. – С.172.

22. Сабилов Л.М., Семенов Д.И. Дифракция лазерного излучения на акустических фонах в изотропной фазе жидких кристаллов // IV Конференция по физической электронике. – 2005. Ноябрь. 2–4. Ташкент. – С.60.

23. Semenov D.I. Influence of local structuring on orientational motion of molecules far from the transition temperature in a nematic liquid crystal // XVI Conference on Liquid Crystals. – 2005. Sept. 18–21. Stare Jablonki, Poland. – P.81.

24. Sabirov L.M., Semenov D.I. Order parameter fluctuations in isotropic phase of liquid crystals: Ultrasonically induced birefringence measurements // XVI Conference on Liquid Crystals. – 2005. Sept. 18–21. Stare Jablonki, Poland. – P.82.

25. Sabirov L.M., Semenov D.I. Ultrasonic and hypersonic studies of fluctuation ordering in isotropic phase of a cholesteric liquid crystal // XVI Conference on Liquid Crystals. – 2005. Sept. 18–21. Stare Jablonki, Poland. – p.80.

26. Semenov D.I. Local structure and orientational modes of motion far from the transition temperature of nematic liquid crystals // 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 2005. Sept. 19–22. Cairo, Egypt. – p.68.

27. Sabirov L.M., Semenov D.I. Analysis of complex molecular dynamics in isotropic phase of a cholesteric liquid crystal // 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 2005. Sept. 19–22. Cairo, Egypt. – p.67.

28. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. High-resolution Brillouin spectroscopy of molecular structurization processes in aqueous solutions // International Conference on Bio-Nanotechnology: Future Prospects in the Emirates. – 2006. Nov. 18–21. Al Ain, United Arabian Emirates. – p.78–80.

29. Сабилов Л.М., Семенов Д.И. Характер предпереходного поведения времени релаксации флуктуаций параметра порядка в изотропной фазе нематических жидких кристаллов // III Международная конференция по молекулярной спектроскопии. – 2006. Май 29–31. Самарканд. – С.37.

30. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haydarov H.S. Negative dispersion of hypersonic velocity in aqueous solution of gamma-picoline // 16th Symposium on Thermophysical Properties. – 2006. Jul. 30 – Aug. 4. Boulder, USA. – p.116

31. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Behavior of hypersonic velocity in aqueous solution of gamma-picoline at various concentrations // 16th Symposium on Thermophysical Properties. – 2006. Jul. 30 – Aug. 4. Boulder, USA. – p.114.

32. Sabirov L.M., Semenov D.I. Ultrasonic and hypersonic studies of complex molecular dynamics in isotropic phase of a cholesteric liquid crystal // 16th Symposium on Thermophysical Properties. – 2006. Jul. 30 – Aug. 4. Boulder, USA. – p.113.

33. Semenov D.I. On some peculiarities of pre-transitional behavior of the relaxation time of order parameter fluctuations in isotropic phase of nematic liquid crystals // 16th Symposium on Thermophysical Properties. – 2006. Jul. 30 – Aug. 4. Boulder, USA. – p.115.

34. Семенов Д.И. Спектры деполяризованного рассеяния света в изотропной фазе нематического жидкого кристалла ПАА // IV Республика илмий-назарий конференцияси «Хозирги замон физикасининг долзарб муаммолари». – 2008. Нояб. 7–8. Термез. – С.47.

35. Семенов Д.И. Температурное поведение времени релаксации флуктуаций параметра порядка в изотропной фазе нематического жидкого кристалла МБА // Республиканская конференция "Оптические методы в современной физике". – 2008. Май 7–8. Ташкент. – С.58.

36. Семенов Д.И. Взаимодействие лазерного излучения и акустических фононов в изотропной фазе жидких кристаллов // «Современные проблемы физики и физическое образование». – 2009. Дек. 11–12. Самарканд. – С.62.

37. Семенов Д.И. О пределах применимости теории Ландау – де Жена для описания динамических характеристик изотропной фазы нематических жидких кристаллов // «Современные проблемы физики и физическое образование». – 2009. Дек. 11–12. Самарканд. – С.22.

38. Сабиров Л.М., Семенов Д.И. Температурная зависимость скорости распространения высокочастотного звука в растворе ацетон–вода // 7-я Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике. – 2013. Янв. 29–31. Москва. – С.292–295.

39. Семенов Д.И., Исмаилов Ф.Р., Хайдаров Х.С. Особенности концентрационной зависимости дисперсии скорости гиперзвука в водных растворах 4–метилпиридина // 7-я Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике. – 2013. Янв. 29–31. Москва. – С.167–170.

40. Сабиров Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Тонкая структура спектра рэлеевского рассеяния света в водных растворах неэлектролита и экспериментальное наблюдение структурных фазовых переходов в жидкости // 2-я международная конференция «Оптика и Фотоника – 2013». – 2013. Сент. 25–27. Самарканд. – С.167–171.

41. Сабилов Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Рассеяние света Мандельштама–Бриллюэна и дисперсия скорости гиперзвука в растворах с особой точкой // 2-я международная конференция «Оптика и Фотоника – 2013». – 2013. Сент. 25–27. Самарканд. – С.172–176.

42. Сабилов Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Обнаружение структурных фазовых переходов в жидкостях по спектрам тонкой структуры рэлеевского рассеяния света в водных растворах неэлектролита // 6-я международная конференция по физической электронике ИПЕС–6. – 2013. Окт. 23–25. Ташкент. – С.221–223.

43. Сабилов Л.М., Семенов Д.И., Хайдаров Х.С. Микронеоднородное строение водных растворов неэлектролита и экспериментальное обнаружение отрицательной дисперсии скорости гиперзвука // 6-я международная конференция по физической электронике ИПЕС–6. – 2013. Окт. 23–25. Ташкент. – С.213–215.

44. Sabirov L.M., Semenov D.I., Haidarov H.S. Nano-scale structuring processes in aqueous solutions of non-electrolyte: High resolutions laser spectroscopy of Brillouin scattering // 7th International Conference on Laser Probing. – 2015. Jun. 7 – 10. East Lansing, USA. – p.40.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан  
ўтказилди (12.04.2016 йил)

Босишга рухсат этилди: 12.05.2016 йил  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 5. Адади: 100. Буюртма: № \_\_\_\_\_.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,  
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ» ДУК