

На правах рукописи

ВИНОГРАДОВ
Владимир Егорович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТЫХ И РАСТЯНУТЫХ
ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность
01.04.14- Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук

Екатеринбург – 2006 г.

Работа выполнена в Институте теплофизики Уральского отделения РАН.

Официальные оппоненты:

| | |
|---|---------------|
| доктор физико-математических наук, профессор | Борисов С.Ф. |
| доктор физико-математических наук, с.н.с. | Павленко А.Н. |
| член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор | Чуканов В.Н. |

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур РАН,
г. Москва

Защита состоится _____ 2006 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Уральском государственном университете им. А.М.Горького по адресу: 620083, Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51, комн. 248

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М.Горького

Автореферат разослан _____ 2006 г.

| | |
|--|-----------------|
| Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук, с.н.с. | Кудреватых Н.В. |
|--|-----------------|

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многие процессы в природе и технике сопровождаются фазовыми переходами жидкость-пар. Большая часть современной энергетики построена на преобразовании потенциальной энергии топлива в кинетическую энергию тепловых машин, где основным технологическим процессом является переход рабочего тела из жидкого в газообразное состояние. Нарастивание тепловой мощности и интенсификация процессов в тепловых аппаратах приводит к тому, что фазовому переходу жидкость-пар предшествует метастабильное (перегретое) состояние жидкости. Вскипание перегретой жидкости сопровождается значительным выделением запасенной в жидкости энергии. Этот факт приходится учитывать при анализе аварийных ситуаций связанных с разгерметизацией сосудов и аппаратов заполненных жидкостью при высоких давлениях и температурах. В связи с чем, в последние годы активно исследуются проблемы под общим названием "паровой взрыв"[1]. Анализ процессов интенсивного фазового перехода из перегретого жидкого состояния в газообразное требует детальной информации об условиях зарождения паровой фазы в перегретой жидкости и ее дальнейшего роста.

Не менее сложными процессами сопровождается вскипание растянутой жидкости. Растянутая жидкость или жидкость при отрицательных давлениях всегда находится в метастабильном состоянии по отношению к пару, поскольку паровая фаза может существовать только при положительных давлениях. На практике растянутое состояние жидкости реализуется чаще всего при быстрых гидродинамических процессах, когда в жидкости возникают локальные растяжения. Наиболее известным случаем возникновения и разрушения растянутого состояния жидкости является кавитация и кавитационное разрушение материалов. В медицине повсеместное применение находят аппараты для ультразвуковых исследований. Их работа сопровождается созданием кратковременных

импульсов отрицательного давления в тканях человека, которые в основном заполнены жидкостью. Повышение интенсивности ультразвукового излучения с целью детализации картины внутренних органов может приводить к кавитации и кавитационному повреждению исследуемых органов.

В общем плане вскипание перегретой и растянутой жидкости должно рассматриваться с единых позиций, как фазовый переход жидкость-пар из метастабильного состояния жидкости.

Цель работы. Экспериментально исследовать начальную стадию вскипания перегретых жидкостей в области отрицательных давлений.

Получить зависимости температуры предельного перегрева жидкостей в интервале давлений от атмосферного до отрицательного давления, по абсолютной величине превышающего давление в термодинамической критической точке.

Сопоставить характер вскипания перегретых жидкостей при отрицательных давлениях с результатами опытов при положительных давлениях.

Проанализировать возможность описания вскипания перегретых жидкостей при отрицательных давлениях с помощью классической теории гомогенной нуклеации.

Исследовать влияние иницирующих факторов на вскипание перегретых жидкостей, как при положительных, так и при отрицательных давлениях.

Получить экспериментальные данные по влиянию легкокипящих примесей, в том числе растворенных в жидкости газов, на кавитационную прочность жидкостей.

На основе экспериментальных результатов проанализировать механизм роста пузырьков пара в перегретой растянутой жидкости.

Научная новизна. Впервые экспериментально исследована кинетика вскипания перегретых диссоциирующих жидкостей. Проанализировано влияние реакции диссоциации на кинетику нуклеации в перегретой

диссоциирующей четырехокси азота. Показано, что влияние диссоциации на процесс нуклеации находится в пределах ошибки эксперимента. Вскипание перегретой диссоциирующей жидкости определяется критическими пузырьками равновесного состава.

Впервые исследована кинетика вскипания перегретой жидкости в области отрицательных давлений вблизи границы спонтанного вскипания.

С использованием разработанных автором экспериментальных методов в широком интервале температур впервые получены зависимости температуры предельного перегрева 12 чистых жидкостей и 5 растворов от величины отрицательного давления. Проведен анализ применимости теории гомогенной нуклеации для описания полученных экспериментальных результатов.

Впервые изучено влияние растворенного в жидкости газа на распад струй перегретой воды, на расходные и тяговые характеристики сопел малого размера при истечении в атмосферу воды, нагретой до 320 °С.

Исследовано влияние растворенного в жидкости газа на кавитационную прочность жидкостей. Впервые показана возможность подавления центров кавитации растворенным в жидкости газом и другими легкокипящими примесями.

Изучено влияние импульсного электрического поля на предельный перегрев жидкости при отрицательных давлениях. Показано, что при кратковременном воздействии электрического поля, не приводящем к образованию заметного количества продуктов электролиза, напряженности поля 10^7 В/см недостаточно для изменения температуры предельного перегрева жидкости.

Впервые экспериментально измерена скорость роста пузырьков пара в перегретой растянутой жидкости. Проведен анализ факторов определяющих скорость роста пузырьков пара в перегретой растянутой жидкости. Показана, что в растущем пузырьке в растянутой перегретой жидкости не успевает установиться равновесное состояние пара.

Научная и практическая ценность. Результаты работы по перегреву диссоциирующей четырёхокси азота и ее растворов с окисью азота использовались для анализа работы насосов, перекачивающих эти жидкости.

Результаты исследований кинетики вскипания диссоциирующих жидкостей показали возможность использования теории гомогенной нуклеации для описания зародышеобразования в таких сложных системах.

Экспериментальные исследования предельных перегревов чистых жидкостей и растворов в области отрицательных давлений подтвердили практическую пригодность формул теории гомогенной нуклеации для расчета кавитационной прочности жидкостей до величины отрицательных давлений $-(2-3)$ критических давления.

Результаты работы важны для понимания механизма возникновения зародышей новой фазы в перегретой растянутой жидкости и начальной стадии их роста.

Полученные в работе экспериментальные результаты по активации вскипания струй перегретой воды растворенными газами представляют практический интерес для интенсификации работы сопел и форсунок.

Результаты исследований истечения газонасыщенной воды через сопла малого размера могут быть полезны при разработке энергетических машин использующих кинетическую энергию, образующуюся при вскипании перегретой жидкости.

Экспериментальные результаты по подавлению гетерогенных центров кавитации представляют практические возможности для управления центрами кипения в перегретой растянутой жидкости.

Автор защищает:

Экспериментальные результаты по исследованию кинетики вскипания перегретых диссоциирующих жидкостей. Вывод о равновесном составе критических пузырьков при вскипании перегретой диссоциирующей четырёхокси азота и ее растворов с окисью азота. Тезис о неравновесном

составе критических пузырьков при инициированном гамма излучением вскипании перегретых диссоциирующих жидкостей.

Результаты экспериментального исследования кинетики вскипания перегретой жидкости в области отрицательных давлений.

Экспериментальные результаты по измерению температурных зависимостей предельной прочности жидкостей. Вывод о том, что граница предельных растяжений жидкостей описывается теорией гомогенной нуклеации.

Экспериментальные результаты по измерению кавитационной прочности жидких и газонасыщенных растворов.

Результаты экспериментального исследования активации вскипания струй перегретой воды, растворенным в жидкости, газом.

Результаты экспериментального исследования влияния газонасыщения на расходные и тяговые характеристики сопел малого размера при истечении вскипающей воды.

Результаты измерений скорости роста пузырьков пара в перегретой растянутой жидкости. Утверждение о том, что при росте пузырьков в перегретой растянутой жидкости давление пара в них существенно меньше равновесного.

Экспериментально обнаруженный эффект подавления центров кавитации гетерогенной природы легкокипящими примесями.

Результаты сравнения кинетической теории прочности и теории гомогенной нуклеации на основе экспериментальных данных по прочности твердых материалов и экспериментально полученных автором результатов по предельной прочности жидкостей.

Вывод о размножении центров кавитации при отражении коротких волн давления от воздушных и паровых полостей в жидкости.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа представляет обобщение результатов исследований автора, выполненных им в Институте теплофизики УрО РАН. Все экспериментальные результаты получены лично

автором при участии руководимых им студентов. Часть теоретических обобщений сделана совместно с соавторами публикаций.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы докладывались на 4 и 5 Всесоюзных конференциях "Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС" (Минск, 1975, 1981 г.), на 6 Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ (Минск, 1978 г.), на 7 и 8 Всесоюзных конференциях "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (Ленинград, 1985, 1990 г.г.), на 1 и 2 Всесоюзном совещании "Метастабильные фазовые состояния (Свердловск, 1985, 1989 г.г.), на 2 Всесоюзной конференции "Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации" (Рига, 1988 г.), на семинаре "Динамика теплофизических процессов в элементах энергетических аппаратов" (Челябинск, 1989 г.), на Всесоюзной конференции "Оптические методы измерений и способы обработки данных теплофизических и нейтроннофизических процессов в элементах энерготехники" (Севастополь, 1990 г.), на 1,2 и 3 Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 1994, 1998, 2002 г.г.), на международном семинаре "Течения с фазовыми переходами" (Гёттинген, Германия, 1995 г.), на международном симпозиуме "Физика теплообмена при кипении" (Москва, 1997 г.), на Минских международных форумах по тепломассообмену (Минск, 2000, 2004 г.г.), на международных семинарах "Теория нуклеации и приложения" (Дубна, 2001, 2006 г.), на международном семинаре "Жидкости при отрицательных давлениях" (Будапешт, Венгрия, 2002 г.), на 26,27 и 28 Сибирском теплофизических семинарах (Новосибирск, 2002, 2004, 2005 г.г.), на 11 Всероссийской конференции по теплофизическим свойствам веществ (Санкт-Петербург, 2005 г.), на 3 Российском совещании "Метастабильные состояния и флуктуационные явления" (Екатеринбург, 2005 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 работ. Список основных публикаций в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из шести глав, заключения и списка литературы из 326 источников. Диссертация изложена на 243 страницах и включает 116 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации кратко изложены современные представления о границе устойчивости перегретой жидкости в области отрицательных давлений. Приведены основные положения классической теории гомогенной нуклеации. Сделан обзор методов и результатов экспериментальных исследований жидкостей в области отрицательных давлений.

Область метастабильных состояний жидкости ограничена линией фазового равновесия жидкость-пар (бинодалью) и границей термодинамической устойчивости (спинодалью) (рис.1). Бинодаль полностью находится при положительных давлениях, вследствие невозможности существования пара при отрицательных давлениях. Её положение определяется однозначно и сравнительно просто экспериментальными измерениями. Границу термодинамической устойчивости жидкости определить экспериментально практически невозможно, так как она разделяет абсолютно неустойчивые (лабильные) состояния от метастабильных состояний, время существования которых конечно и уменьшается с приближением к спинодали.

Спинодаль существует как при положительных, так и при отрицательных давлениях, поскольку жидкость, как и твердое тело, может растягиваться вследствие значительного межмолекулярного взаимодействия.

Согласно термодинамической теории устойчивости положение спинодали определяется равенством нулю первой производной от давления по объему при постоянной температуре:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = 0.$$

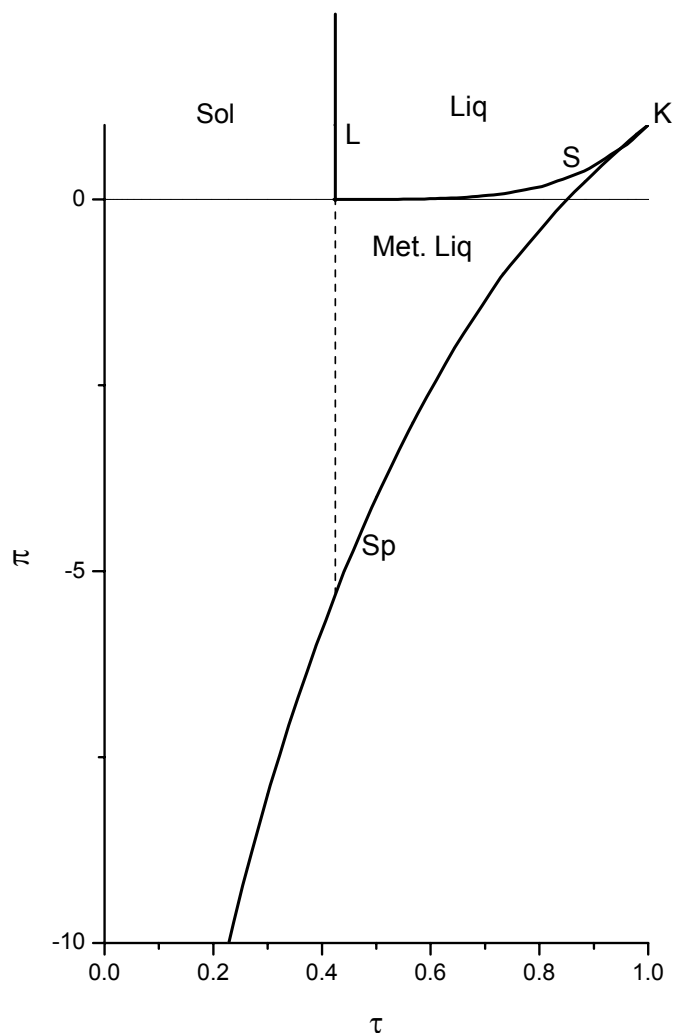


Рис.1.1. Диаграмма фазовых состояний простого вещества в приведенных координатах.

Сплошные линии: S – бинодаль, Sp – спинодаль, L – линия плавления. Штриховая линия – продолжение линии плавления в область отрицательных давлений. К – критическая точка.

Зная единое уравнение состояния жидкости и пара несложно получить уравнение спинодали из её определения. Проблема заключается в самом уравнении состояния, которое невозможно достаточно точно определить вблизи границы устойчивости. Время существования метастабильного

состояния жидкости конечно и определяется теорией гомогенного зародышеобразования[2]:

Согласно классической теории гомогенной нуклеации частота зародышеобразования определяется выражением:

$$J_1 = A \exp(-W_K / kT), \quad (1)$$

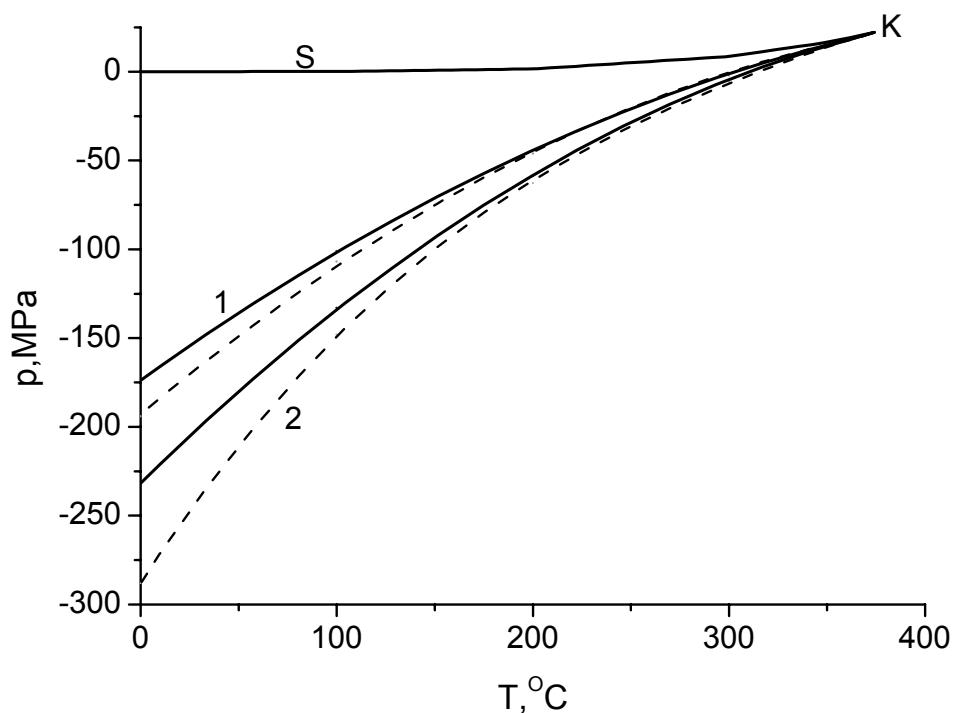


Рис.2. Прочность воды на растяжение, рассчитанная по формулам теории гомогенной нуклеации.

1 – для $J = 10^{12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$; 2 - $J = 10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Сплошные линии по формулам Кагана, штриховые по формулам Дерягина; S – бинадаль; K – критическая точка.

Величину J_1 называют частотой зародышеобразования и относят к единице объема метастабильной фазы. Тогда она выражает число жизнеспособных зародышей новой фазы, образующихся в единице объема в единицу времени. Анализ этих формул в монографиях [2] и [3] показал, что предэкспоненциальные множители в них отличаются в пределах нескольких

порядков. Это приводит к ошибке расчета температуры предельного перегрева жидкости в пределах 0,2 – 0,3К. Что для большинства случаев меньше погрешности эксперимента.

Однако, это не означает автоматического применения классических формул за рамками их апробации. И это относится, в частности, к жидкости при больших отрицательных давлениях, где возникают проблемы с определением границы устойчивости. Кроме того, расчет по формулам теории гомогенной нуклеации в области больших отрицательных давлений дает большой разброс при температурах вблизи тройной точки жидкости(рис.2).

В первой главе сделан обзор существующих методов исследования жидкостей в области отрицательных давлений и экспериментальных результатов исследований. Показано, что за исключением жидкого гелия систематических исследований жидкостей в области отрицательных давлений не проводилось. Большинство экспериментальных результатов получены для комнатной температуры и сравнения с теорией гомогенной нуклеации носят отрывочный характер. Наиболее близкие экспериментальные данные по прочности жидкостей на растяжение к теоретическим расчетам получены динамическими методами исследований. В связи с отсутствием систематических экспериментальных исследований вопрос о применимости теории гомогенной нуклеации в области больших растяжений остается открытым.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию кинетики вскипания перегретых и растянутых жидкостей.

Для работы с химически агрессивными жидкостями создана специальная экспериментальная установка, работающая по принципу чистой пузырьковой камеры[3].

Изучена кинетика вскипания термически диссоциирующей четырехокиси азота($N_2O_4 \rightleftharpoons NO_2$) фотодиссоциирующих жидкостей(жидкого хлора и перфторпрпильодида(C_3F_7J)). Для четырехокиси азота получены

зависимости среднего времени жизни перегретой жидкости от температуры и давления в интервале давлений от 0.2 до 6.0 МПа. На рис. 3 показаны результаты опытов с $N_2O_4 \rightleftharpoons NO_2$ при постоянной температуре.

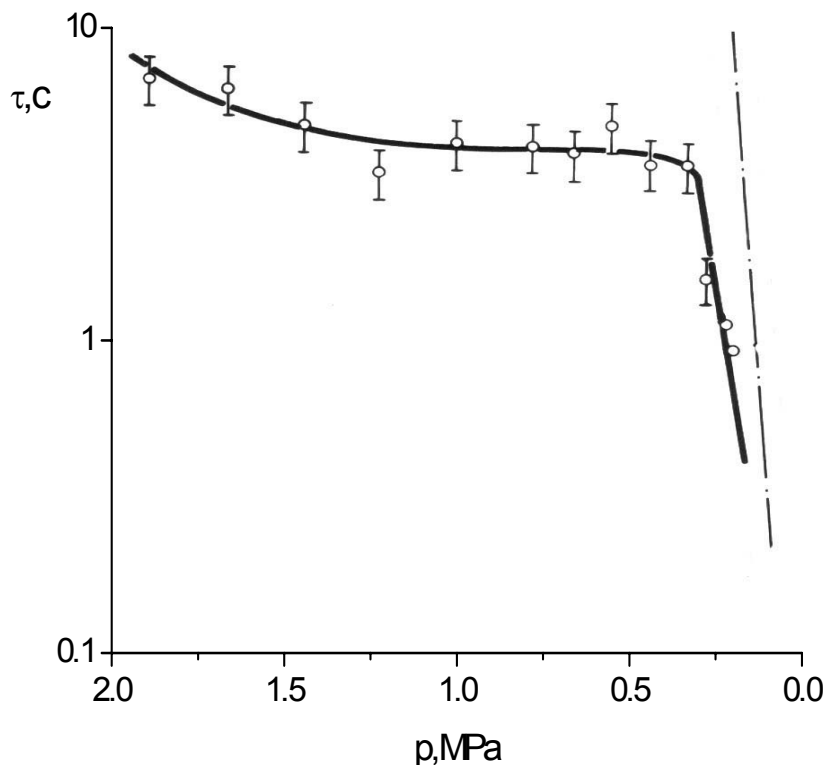


Рис.3.

Зависимость среднего времени жизни перегретой N_2O_4 от давления при $T = 122,0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p_s = 3,8 \text{ МПа}$.

Сделан анализ влияния реакции диссоциации на кинетику вскипания перегретой жидкости, который показал, что учет диссоциации вызывает сдвиг границы предельного перегрева жидкости в пределах погрешности эксперимента ($\sim 0.1\text{K}$). Из сравнения результатов опытов и расчетов сделан вывод о химическом равновесии критических пузырьков, определяющих вскипание перегретой диссоциирующей четырехокси азота.

Кинетика вскипания перегретых фотодиссоциирующих жидкостей изучалась на примере хлора и перфторпропилийодида (C_3F_7I). Хлор имеет сплошной спектр поглощения в области ближнего ультрафиолета. Энергия

диссоциации равна 2.48 эв. Молекула хлора диссоциирует на два атома, время жизни которых не превышает $10^{-8} - 10^{-10}$ с.

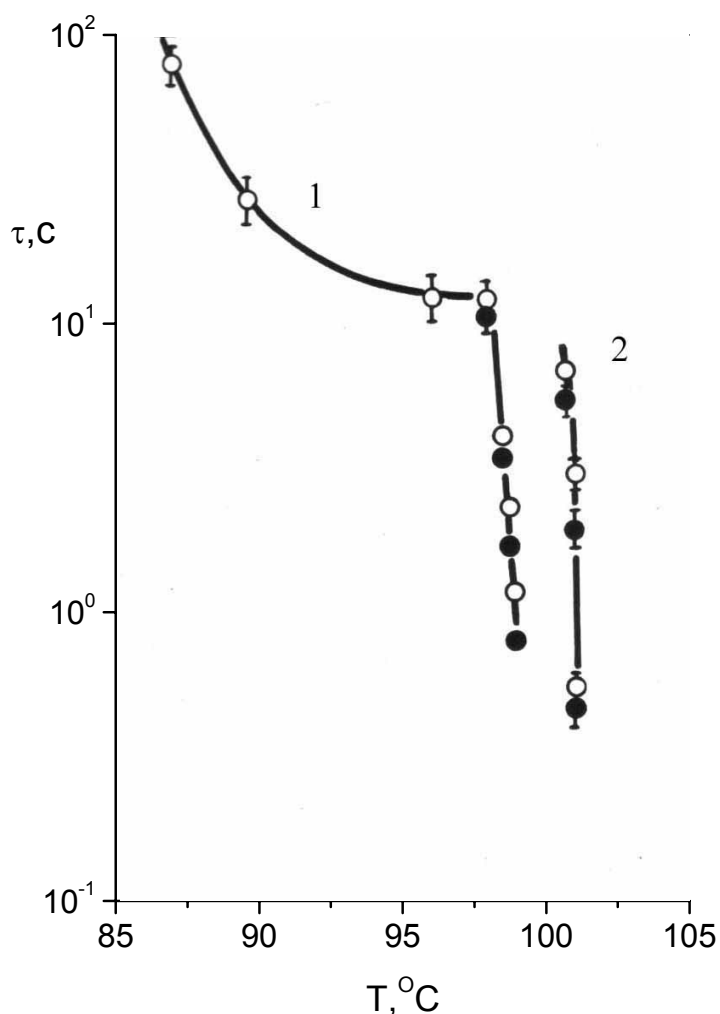


Рис.4.

Температурная зависимость среднего времени жизни перегретого хлора в опытах с ультрафиолетовым облучением: 1 – $p=1.2$ МПа; 2– $p=1.6$ МПа.

Светлые точки – опыты без облучения, темные с облучением.

Для хлора на границе спонтанного вскипания наблюдается небольшое систематическое уменьшение $\bar{\tau}$ под действием ультрафиолетового излучения. На плато это уменьшение отсутствует. В случае перфторпропилиодида на границе спонтанного вскипания наблюдается также уменьшение $\bar{\tau}$, хотя и менее выраженное. На плато для перфторпропилиодида $\bar{\tau}$ под действием ультрафиолетового излучения

несколько выше, чем в естественных условиях. Однако это увеличение практически не выходит за рамки погрешности в определении $\bar{\tau}$.

На основании полученных результатов сделан вывод об отсутствии инициирующего действия поглощаемых перегретой жидкостью фотонов. Небольшое уменьшение $\bar{\tau}$ на границе спонтанного вскипания может быть объяснено увеличением средней температуры жидкости при поглощении фотонов. Численные оценки показывают, что это увеличение температуры примерно такой же величины как и наблюдаемый в опытах сдвиг границы спонтанного вскипания под действием ультрафиолетового облучения.

Оказывается, что локального поглощения жидкостью энергии ~ 5 Мэв ещё недостаточно для заметного инициирования вскипания перегретой жидкости.

С помощью специально сконструированной экспериментальной установки, создающей отрицательное давление в жидкости методом трубки Бергло, исследована кинетика вскипания перегретого н-пентана в области отрицательных давлений. Получены зависимости среднего времени жизни перегретого н-пентана от величины отрицательного давления в жидкости для нескольких температур. Результаты одного из таких опытов приведены на рис.5. Форма кривых $\bar{\tau}(-p)_T$ повторяет изобары $\bar{\tau}(T)_p$ для н-пентана[2] и исследованных нами жидкостей(см.рис.3,4) при положительных давлениях. Наблюдается резкий спад зависимости $\bar{\tau}(-p)_T$ на границе спонтанного вскипания перегретой растянутой жидкости. Её положение в пределах погрешности эксперимента совпадает с расчетами (штриховая линия) по формулам теории гомогенной нуклеации .

Результаты исследований кинетики вскипания перегретого растянутого н-пентана показали, что кинетика вскипания перегретой жидкости при переходе от положительных давлений к отрицательным практически не изменяется, по крайней мере, в области отрицательных давлений, по абсолютной величине равных давлению в термодинамической критической

точке. Чувствительность перегретой жидкости к инициирующим факторам остается на том же уровне, что и при атмосферном давлении. Граница предельных перегревов жидкости непрерывным образом продолжается в область отрицательных давлений.

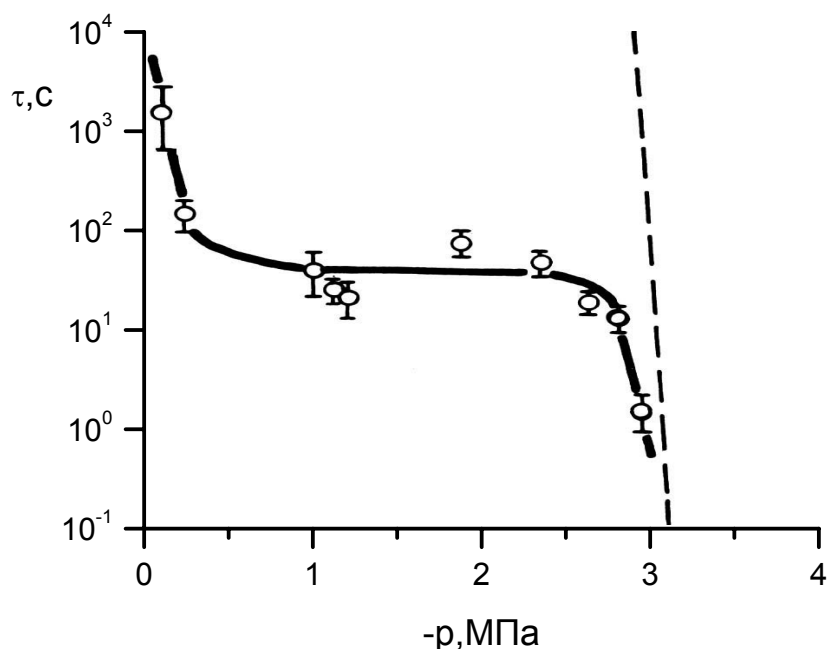


Рис.5. Зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана от величины отрицательного давления в жидкости.

Точки – эксперимент, штриховая линия расчет для $J = 3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В третьей главе диссертации приведены результаты экспериментального исследования предельных перегревов чистых жидкостей и жидких растворов при импульсном растяжении.

Используя метод инверсии волны давления в волну растяжения при отражении от свободной поверхности жидкости[4] изучено объемное вскипание растянутых жидкостей в волне отрицательного давления. Фотографии развития кавитации в н-пентане с ростом амплитуды импульса отрицательного давления приведены на рис.6.

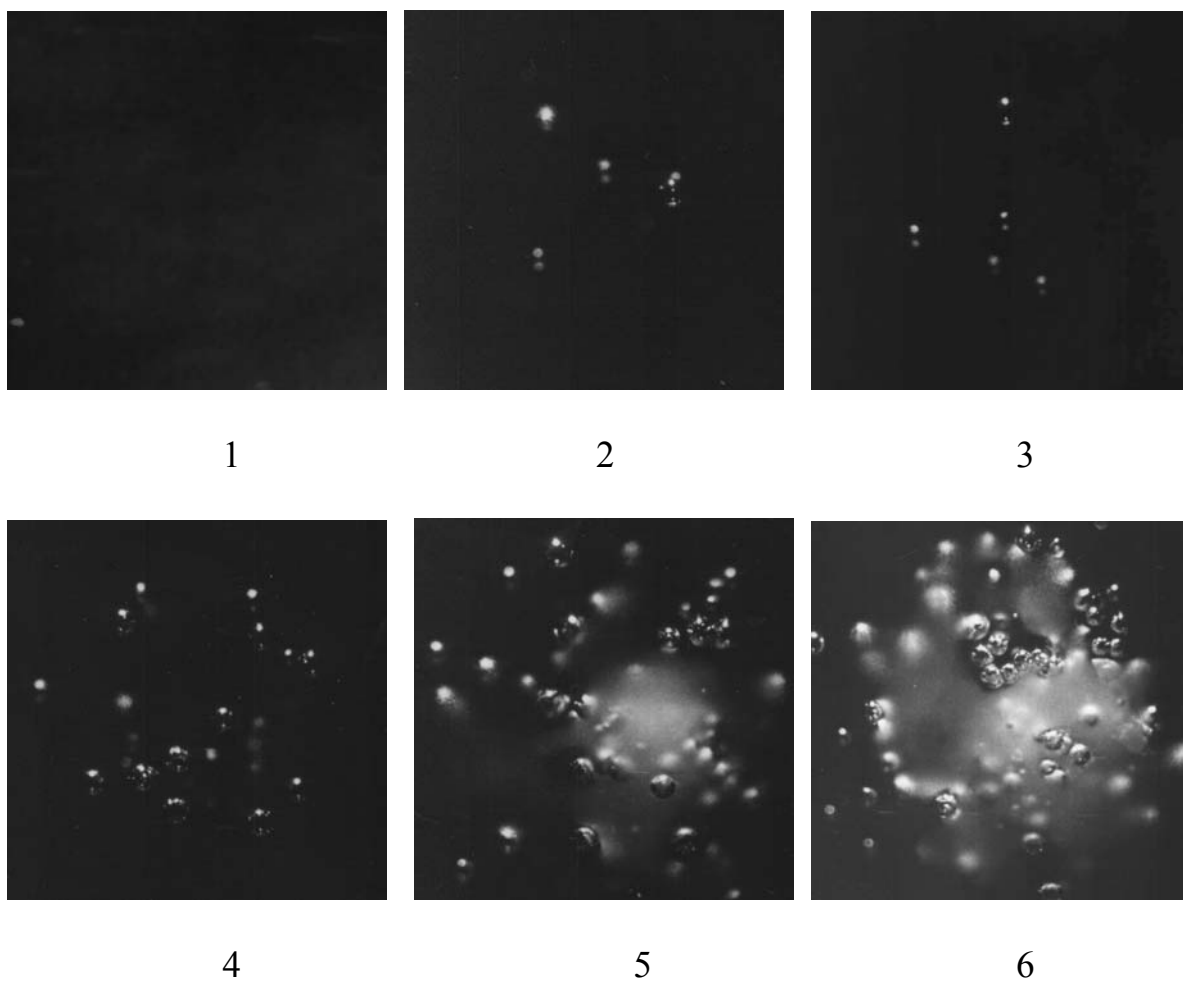


Рис.6. Развитие кавитации в н-пентане с ростом отрицательного давления в жидкости.

1 – $p = -8.0$ МПа, 2 – -8.3 МПа, 3 – -9.3 МПа, 4 – -10.4 МПа, 5 – -14.5 МПа, 6 – -15.5 МПа.

Увеличение амплитуды импульса отрицательного давления приводит сначала к появлению отдельных кавитационных пузырьков, а затем кавитационных полостей. Численные оценки показали, что в этих опытах реализуются частоты зародышеобразования $J = 10^{11} - 10^{13} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$. В таблице 1 приведены экспериментальные результаты для 5 исследованных этим методом жидкостей и сравнение с расчетом теоретической прочности жидкости по формулам теории гомогенной нуклеации для $J = 10^{12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Расчетным значениям предельной прочности н-пентана и н-гексана в пределах погрешности эксперимента соответствуют отрицательные давления в жидкости, вызывающие образование кавитационных полостей. Для н-

гептана и толуола вплоть до отрицательных давлений в жидкости -20 МПа не обнаружено появления кавитационных полостей.

Таблица 1.

| жидкость | Т, °С | Единичные пузырьки | | Кавитационные полости | | Теоретическая прочность -р, МПа |
|-----------|-------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|
| | | -р, МПа | $r_K \cdot 10^9$, м | -р, МПа | $r_K \cdot 10^9$, м | |
| н –пентан | 25 | 8.3 | 3.7 | 14.5 | 2.1 | 15.5 |
| н-гексан | 25 | 9.5 | 3.7 | 17.5 | 2.0 | 19.5 |
| н-гептан | 25 | 11.0 | 3.7 | - | - | 23.4 |
| толуол | 25 | 11.5 | 4.5 | - | - | 36.5 |
| вода | 25 | 1.0 | 140 | 3.0 | 48 | 153 |

На основе метода растяжения жидкости в волне отрицательного давления и импульсного перегрева жидкости на поверхности платинового нагревателя[5] разработана методика и создана экспериментальная установка по импульсному перегреву жидкостей в волне отрицательного давления. Экспериментальная установка позволяет проводить исследования вскипания перегретой жидкости в интервале температур от 0 до 400 °С и давлений от -15 до +5 МПа. С помощью этой установки получены зависимости температуры предельного перегрева 12 чистых жидкостей и 5 растворов. Типичная зависимость температуры предельного перегрева от давления показана на рис.7. Она качественно ничем не отличается от полученных ранее аналогичных зависимостей в области положительных давлений. Для всех исследованных жидкостей кроме воды и водных растворов с высокой концентрацией воды прослеживается плавный переход зависимостей $T_{II}(p)$ из области положительных давлений в область растянутых состояний жидкости. На рис.8. приведены результаты опытов с органическими жидкостями в приведенных координатах. В целом, экспериментальные значения температур предельного перегрева, как правило, лежат ниже

рассчитанных по теории нуклеации. Это характерно также и для области положительных давлений.

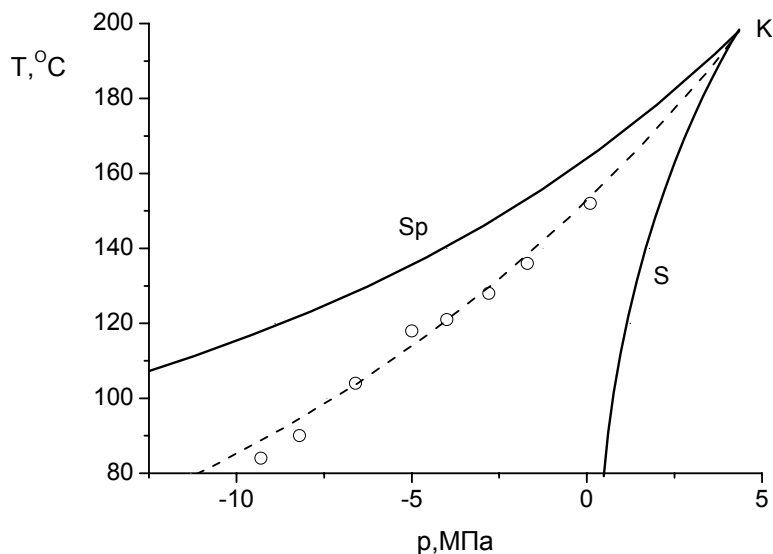


Рис.7. Зависимость температуры предельного перегрева фреона 11 от давления. Точки - эксперимент; Sp – спинопаль, рассчитанная по формуле (1.3), S – линия равновесия жидкость-пар, штриховая линия – расчет по формулам (1.4, 1.14, 2.8) для $J=10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Причем наблюдается увеличение расхождения с ростом отрицательного давления в жидкости. Анализ показывает, что небольшой вклад в это расхождение вносит некоторое снижение фиксируемой в опытах частоты зародышеобразования с ростом величины отрицательного давления вследствие увеличения скорости роста пузырьков на проволочном зонде. Возможно, что нарастающее с величиной отрицательного давления расхождение между опытом и расчетом обусловлено не только абсолютной погрешностью в определении величины отрицательного давления, но и масштабными эффектами. Поскольку количество молекул в критическом пузырьке при отрицательных давлениях ~ -10 МПа для исследованных жидкостей лежит в пределах от 1 до 10.

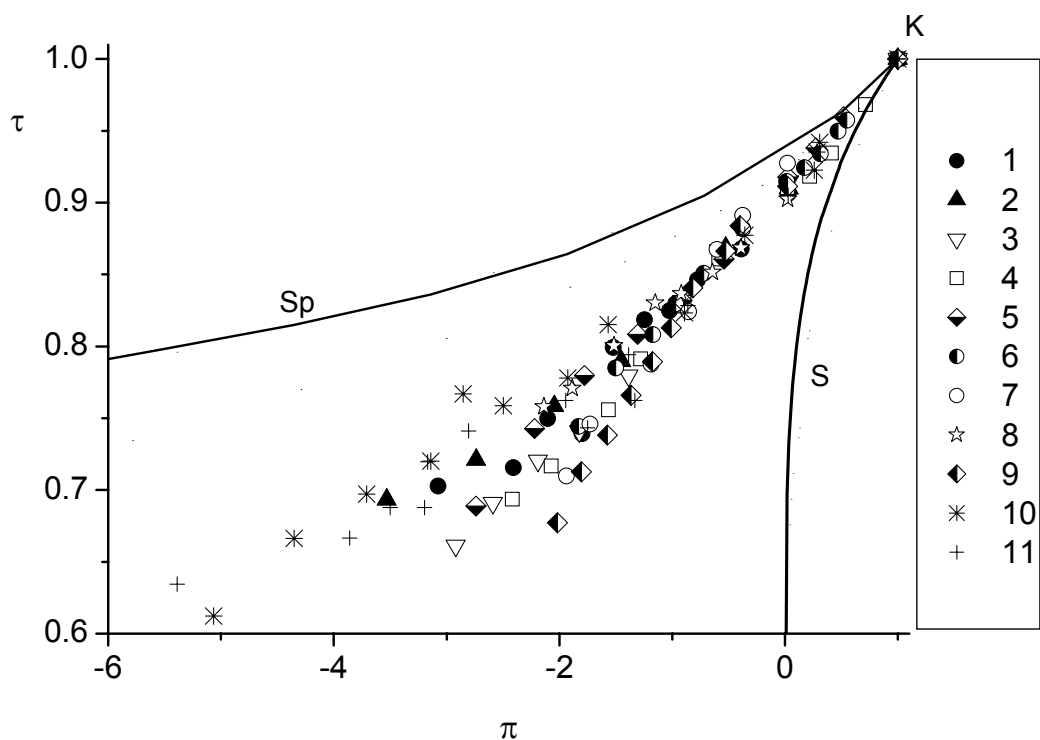


Рис.8. Температуры предельного перегрева органических жидкостей в зависимости от давления в приведенных координатах. Точки –эксперимент: 1 – диэтиловый эфир, 2 – н-гексан, 3 – н-гептан, 4 – бензол, 5 – толуол, 6 – этиловый спирт, 7 – изобутиловый спирт, 8 – фреон11, 9 – ацетон, 10 – гексадекан, 11 – н – пентан. Сплошные линии: S – линия равновесия жидкость – пар, Sp – спинодаль. К – критическая точка.

Получены экспериментальные зависимости температуры предельного перегрева водных растворов этилового спирта, изобутилового спирта и ацетона. На рис.9 показаны результаты опытов с растворами воды в ацетоне. Зависимость $T_{II}(p)_J$ для чистой воды меняет наклон при переходе в область отрицательных давлений. Проведенные исследования показали, что зависимости температуры предельного перегрева водных растворов этилового спирта, изобутилового спирта и ацетона в области отрицательных давлений при концентрациях воды ниже концентрации азеотропного состава

имеют такой же вид, как и в случае исследованных ранее органических жидкостей.

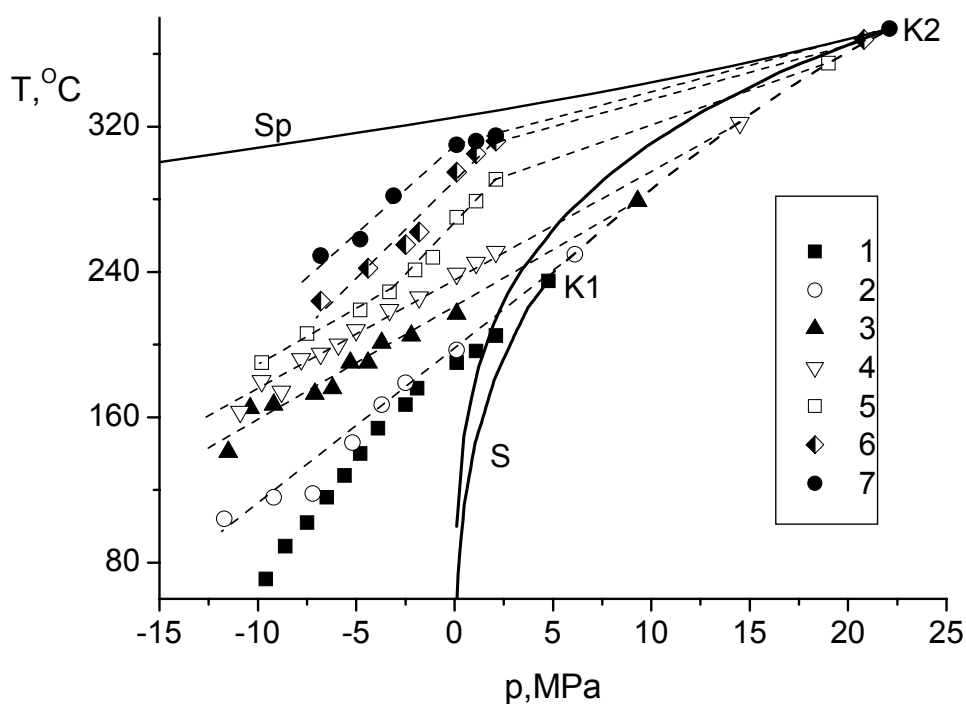


Рис.9. Зависимость температуры предельного перегрева растворов ацетон-вода от давления. Точки – эксперимент: 1 – ацетон, 2 – мольная доля воды $x = 0.31$, 3 - $x = 0.64$, 4 - $x = 0.86$, 5 - $x = 0.96$, 6 - $x = 0.99$, 7 – вода. Sp – спинопаль воды, рассчитанная по формуле (1.3), S – линия равновесия жидкость-пар чистых жидкостей; K1, K2 – критические точки ацетона и воды соответственно. Штриховая линия – критическая кривая растворов.

Изменение наклона кривых $T_{\Pi}(P)_{x,l}$ при заходе в область отрицательных давлений происходит лишь при концентрациях воды, превышающих концентрацию азеотропного состава. Соответственно для этилового спирта при объемных концентрациях воды более 4%, для ацетона при объемных концентрациях воды свыше 60%. В случае изобутилового спирта любые добавки воды изменяют наклон кривых $T_{\Pi}(P)_{x,l}$ при заходе в область отрицательных давлений, поскольку для него не существует азеотропных

растворов с водой. Таким образом, для всех исследованных жидкостей кроме воды и водных растворов с концентрацией воды выше азеотропного состава прослеживается плавный переход зависимостей $T_{II}(p)$ из области положительных давлений в область растянутых состояний жидкости, и полученные экспериментальные результаты с точностью достаточной для практических применений описываются с помощью теории гомогенной нуклеации.

В четвертой главе диссертации рассмотрено влияние растворенного в жидкости газа на перегрев жидкостей при положительных и отрицательных давлениях.

Методом чистой пузырьковой камеры исследовано влияние растворенной в четырехокиси азота добавки газа окиси азота на кинетику вскипания и предельный перегрев диссоциирующей жидкости. На рис.10 показана зависимость температуры предельного перегрева раствора $N_2O_4 - NO$ от концентрации окиси азота. В области малых концентраций окиси азота получены линейные зависимости температуры предельного перегрева жидкости от концентрации, характерные для идеальных растворов.

Сравнение экспериментальных результатов с расчетом по равновесным свойствам раствора позволило сделать вывод о химическом равновесии критических пузырьков, определяющих вскипание перегретого раствора.

Методом импульсного перегрева жидкости в волне отрицательного давления изучено влияние растворенного в жидкости углекислого газа на кавитационную прочность этилового спирта, гексадекана и воды при концентрации CO_2 до 15 мольных процентов. Для раствора двуокиси углерода в этиловом спирте получены линейные зависимости кавитационной прочности, характерные для идеальных растворов(рис.11). При растворении углекислого газа в воде до 1.8 мольных процентов устраняется излом на зависимости $T_{II}(p)$ при переходе от положительных давлений к отрицательным, аналогично тому, как это происходит при растворении в ней ацетона или этанола до азеотропных концентраций.

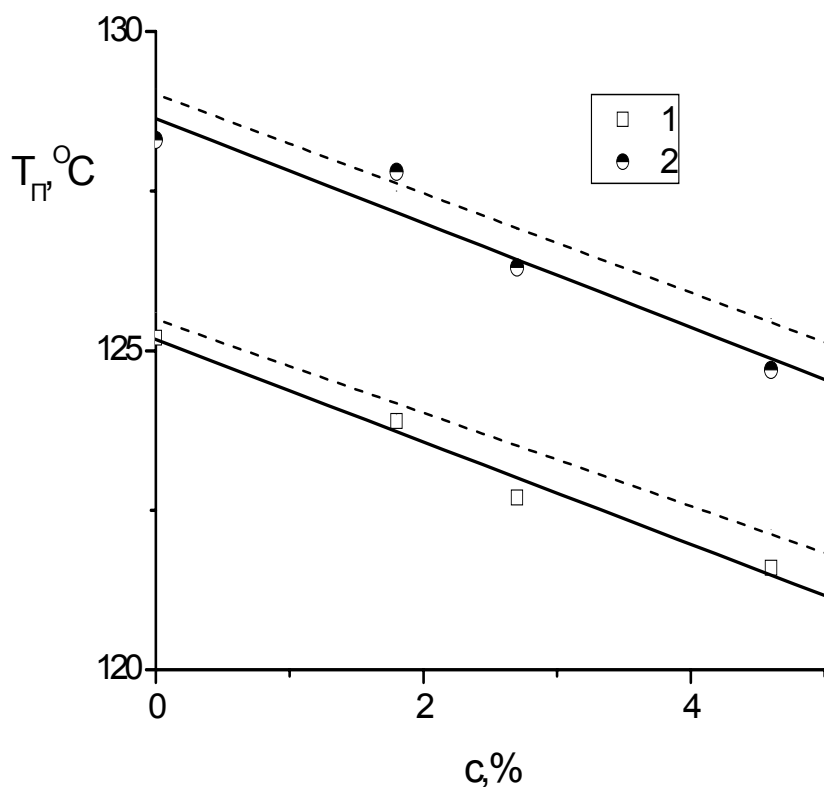


Рис. 10. Зависимость температуры достижимого перегрева раствора

$N_2O_4 - NO$ от весовой концентрации NO :

1 - $p = 0.98$ МПа; 2 - 2.0 МПа. Точки — эксперимент, штриховые линии - расчет по формулам теории нуклеации.

Для растворов диоксида углерода в гексадекане наблюдается сближение кавитационной прочности чистого гексадекана и гексадекана, насыщенного CO_2 при температурах ниже 200 °С.

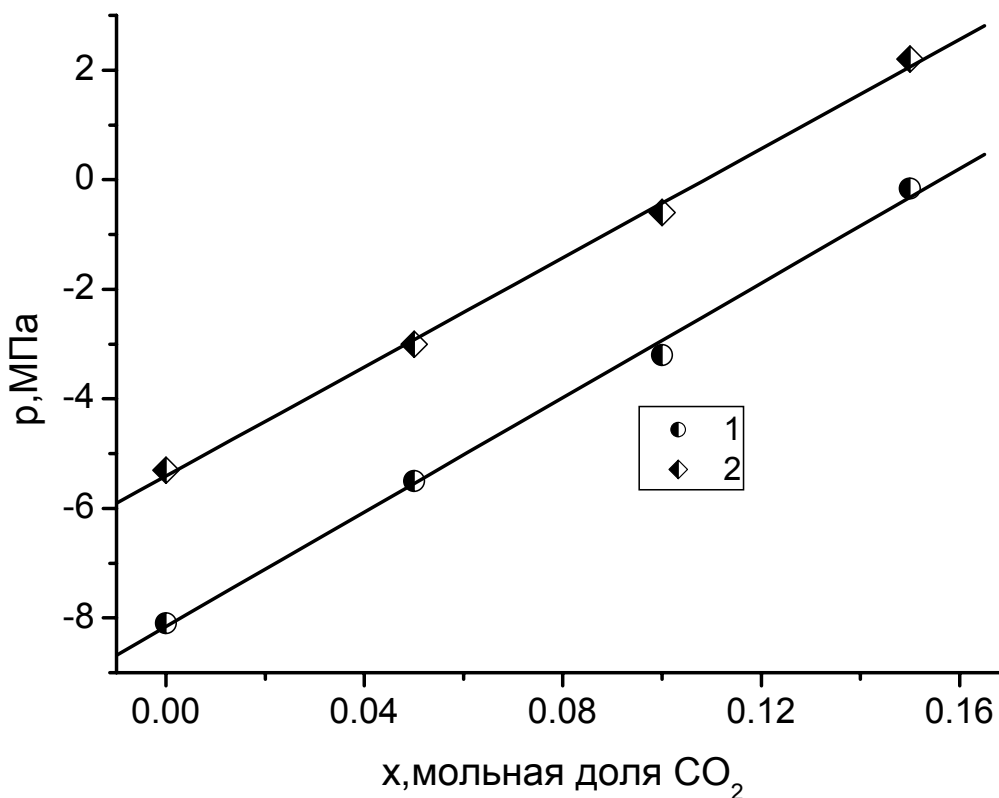


Рис.11. Зависимость кавитационной прочности растворов этанол-диоксид углерода от концентрации диоксида углерода. 1 – $T = 140^{\circ}\text{C}$, 2 – $T = 160^{\circ}\text{C}$.

Изучено влияние газонасыщения на тяговые и расходные характеристики сопел и распад струй перегретой воды, истекающей через сопла малого размера (диаметр ~ 0.8 мм, длина $\sim 1-2$ мм). При концентрации CO_2 до 0.025 моль/л, аргона до 0.015 моль/л влияние газонасыщения на тяговые и расходные характеристики сопел малого размера сказывается только вблизи границы спонтанного вскипания воды ($T \geq 310^{\circ}\text{C}$), вследствие небольшого снижения температуры предельного перегрева жидкости, вызванного добавками газа. Расходные характеристики имеют в этой области максимум, обусловленный падением расхода в результате взрывного вскипания жидкости в горле сопла при температурах $T \geq 0.9T_K$.

Показано, что насыщение жидкости газом активирует распад свободных струй перегретой воды в области температур ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, где для обезгаженной воды наблюдаются нераспавшиеся струи перегретой жидкости(рис.12).

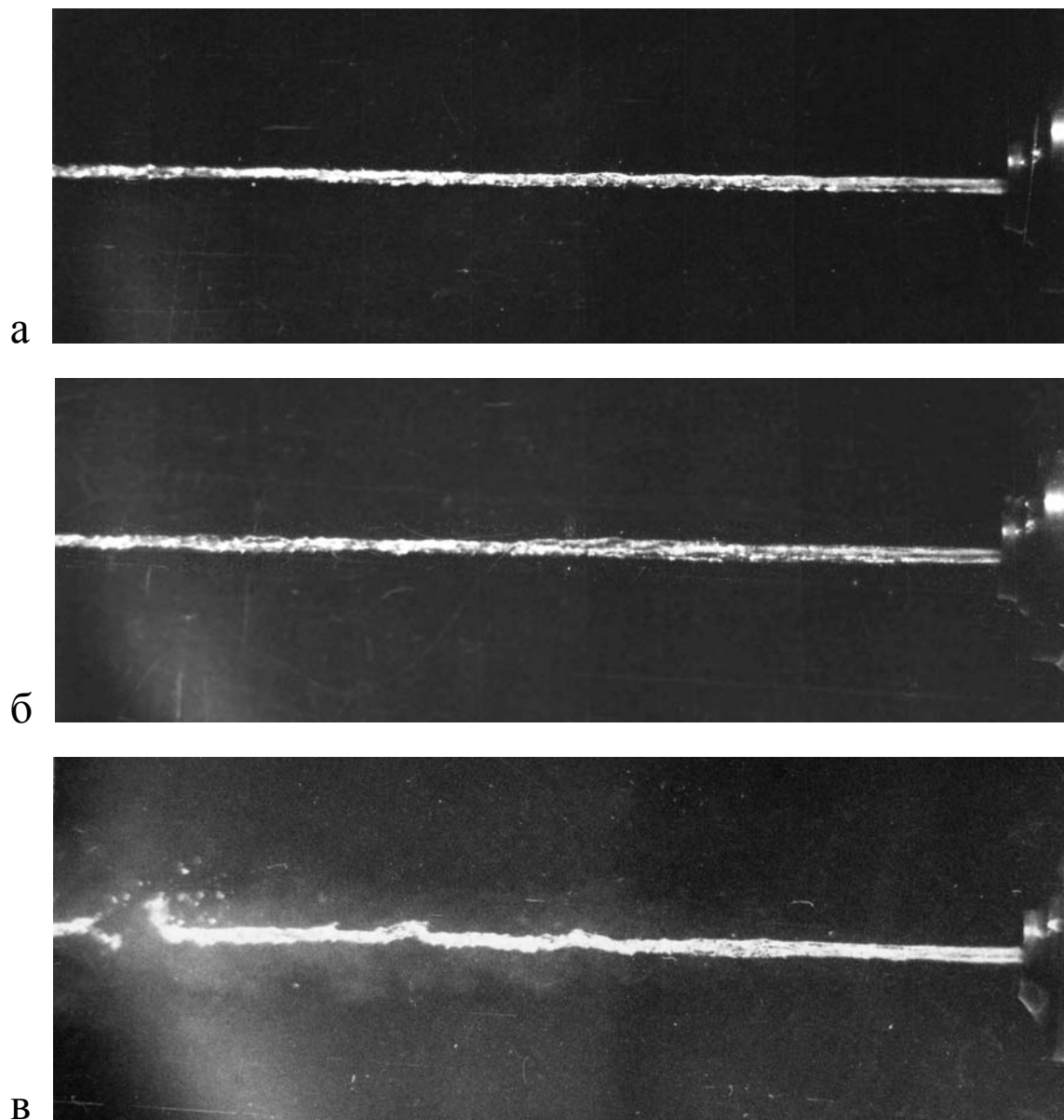


Рис. 12. Фотографии струй воды, истекающей под давлением 0.5 МПа при температуре $T = 92^{\circ}\text{C}$ - а – дистиллированная вода, б - вода, насыщенная аргоном ($x = 0.007$ моль/л); в - вода, насыщенная CO_2 ($x = 0.06$ моль/л).

Это вызвано, как увеличением скорости роста паровой фазы на готовых центрах кипения, так и усилением неустойчивости струй вследствие сильного испарения с их поверхности.

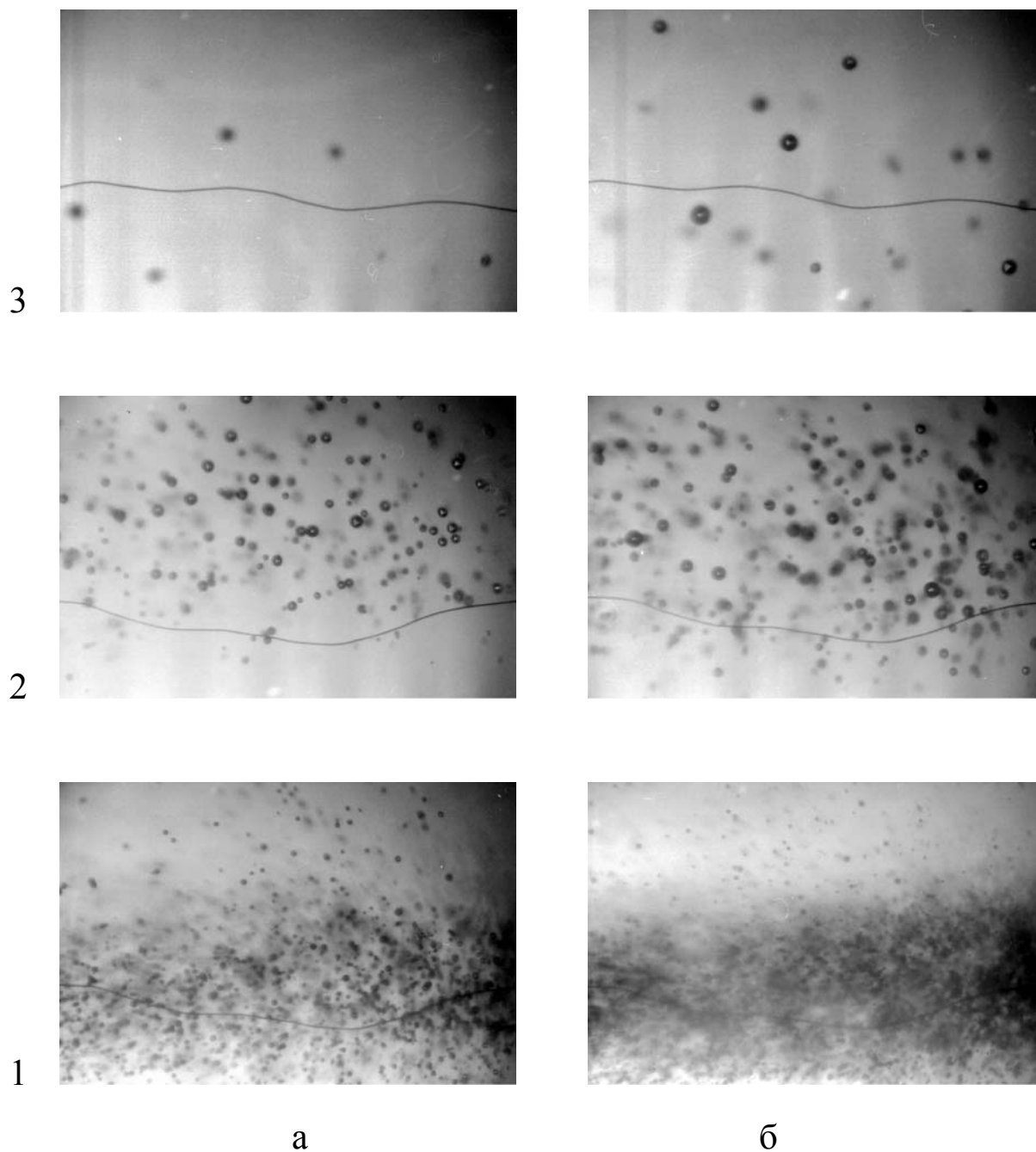


Рис.13. Фотографии зоны кавитации в газонасыщенной воде.

1-вода при атмосферном давлении, 2- вода под давлением азота 2.0 МПа, 3- вода под давлением углекислого газа 2.0 МПа; а - амплитуда волны отрицательного давления $p_{оп} = -2.8$ МПа, б - $p_{оп} = -3.7$ МПа.

Методом импульсного растяжения жидкости в волне отрицательного давления изучено влияние растворенного в жидкости углекислого газа на плотность центров кавитации в воде. Типичные фотографии представлены на рис.13.

Кавитационные пузырьки в воде, находящейся при атмосферном давлении, появляются уже при прохождении импульса отрицательного давления $p_{оп}$ порядка 1 МПа. При $p_{оп} = -2.8$ МПа, как видно из рисунка, наблюдается облако большого количества мелких пузырьков. (Размер зоны фотографирования на рисунке составляет примерно 4×2.5 мм.) Количество пузырьков увеличивается с ростом отрицательного давления в жидкости.

Выдержка воды под давлением азота 2.0 МПа уменьшает количество кавитационных пузырьков в жидкости, увеличивая ее кавитационную прочность. Наблюдается увеличение кавитационной прочности жидкости при растворении в ней углекислого газа. Кроме того, были проведены исследования с другими растворимыми в воде добавками: HCl, CH_2O_2 (муравьиная кислота), NH_3 , C_3H_6O (ацетон). Мольная концентрация добавок во всех опытах составляла 1.5%, что соответствовало концентрации CO_2 .

Проведенные опыты показали, количество центров кавитации в воде сокращается при растворении в ней ряда легкокипящих добавок. Подавление центров кавитации в воде наблюдается, прежде всего, для примесей, которые в той или иной мере имеют кислотные свойства. Вероятно, одной из причин подавления центров кавитации в воде является связывание ионов водорода в воде при растворении в ней вышеуказанных добавок. Другой возможной причиной подавления центров кавитации в воде может быть заполнение молекулами примесей пустот в ажурной структуре воды. На это указывает зависимость эффекта понижения плотности центров кавитации от размера молекул примеси. Наибольший эффект получен при растворении двухатомных молекул(HCl)(рис.14).

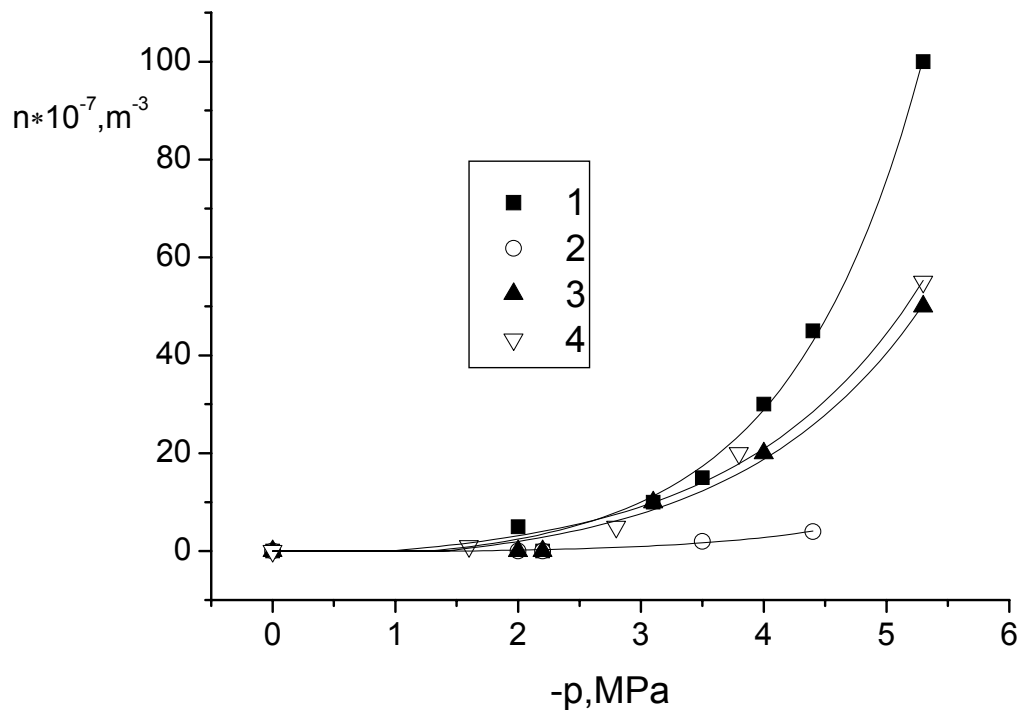


Рис.14. Зависимость плотности центров кавитации в воде от величины отрицательного давления при температуре 20 °С.

1 – дистиллированная вода; 2 – вода с HCl; 3 – вода с муравьиной кислотой; 4 – вода с CO₂. (Мольная доля примесей в опытах составляла 1.6%).

Пятая глава диссертации посвящена инициированному вскипанию перегретых и растянутых жидкостей.

Методом чистой пузырьковой камеры исследована кинетика вскипания перегретого жидкого хлора, четырехоксида азота и ее растворов с окисью азота под действием γ – излучения малой интенсивности.

На рис.15 показаны результаты опытов с раствором окиси азота в четырехоксида азота.

Наблюдается заметное уменьшение $\bar{\tau}$ под действием γ - излучения вблизи границы спонтанного вскипания перегретой жидкости. Кривые, полученные при действии ионизирующего излучения имеют такой же вид, как хвосты изобар, полученных в естественных условиях.

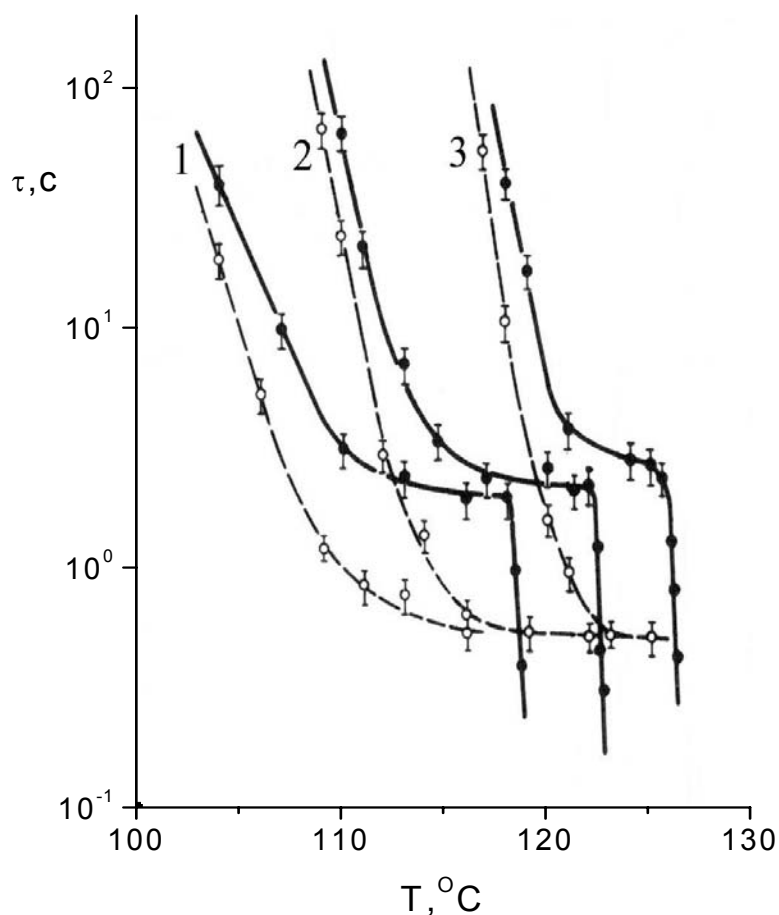


Рис.15. Температурная зависимость среднего времени жизни перегретого раствора N_2O_4-NO по изобарам при весовой концентрации $NO - 2/7\%$:
 1 – $p = 0.29$ МПа; 2 – $p = 0.98$ МПа; 3 – $p = 2.0$ МПа; Светлые точки и штриховые линии – результаты опытов в поле γ - излучения; черные точки и сплошные линии – в естественных условиях.

Поэтому, как и в случае других, ранее исследованных жидкостей, отклонение хода экспериментальных кривых от теоретических при больших $\bar{\tau}$ в отсутствие источника излучения можно объяснить иницирующим действием естественного радиоактивного фона и космического излучения. Как в естественных условиях, так и в поле γ - излучения при низких давлениях на изобарах наблюдается участок фактически постоянной радиационной чувствительности перегретой жидкости вблизи границы

спонтанного вскипания. Наличие такого участка отмечалось для большого числа исследованных чистых жидкостей и бинарных растворов [3,4].

Для хлора наблюдается как и для других однокомпонентных жидкостей [3] корреляция между частотой инициированного γ - излучением вскипания перегретой жидкости и работой образования критического пузырька. Нарушение корреляции для растворов окиси азота в четырехокиси указывает на то, что при инициированном вскипании перегретой жидкости критические пузырьки имеют неравновесный состав.

С помощью экспериментальной установки по импульсному растяжению жидкостей в волне отрицательного давления исследовано влияние слабого электрического поля на кавитацию в ацетоне и н-пентане.

Показано, что постоянное электрическое поле напряженностью $0.4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ вызывает образование кавитационных пузырьков на электроде в ацетоне при комнатной температуре и отрицательных давлениях $\sim 3.0 \text{ МПа}$.

Изучено влияние коротких импульсов электрического поля длительностью до 100 мкс на вскипание ацетона при импульсном перегреве жидкости на поверхности платинового нагревателя в волне отрицательного давления.

Показано, что короткие импульсы электрического поля напряженностью свыше 10^6 В/м активируют гетерогенные центры кипения на проволочном нагревателе в ацетоне как при атмосферном так и при отрицательном давлении в жидкости. Однако такой напряженности импульсов электрического поля оказалось недостаточно для заметного сдвига температуры предельного перегрева растянутой жидкости.

Проведено сопоставление двух кинетических подходов к описанию прочности растянутых образцов: теории гомогенного зародышеобразования и кинетической теории прочности [6]. Показано, теория гомогенной нуклеации удовлетворительно описывает границу предельных растяжений жидкости. Однако не пригодна для описания результатов измерения среднего времени жизни перегретой и растянутой жидкости в области гетерогенного вскипания. В этих случаях возможно использование феноменологических

формул кинетической теории прочности, которые дают более слабую зависимость времени жизни растянутого образца от напряжения чем теория гомогенной нуклеации (рис.16).

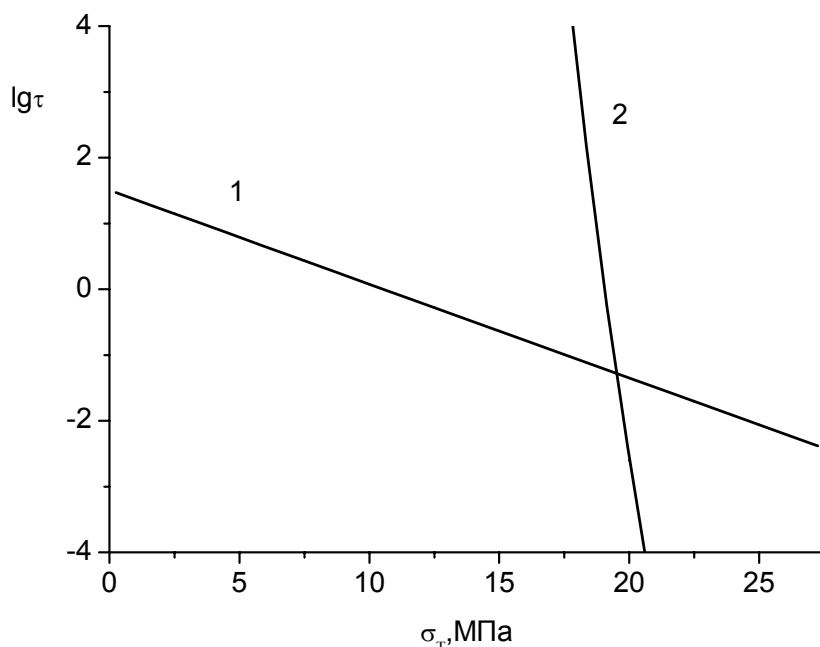


Рис.16. Зависимость долговечности н-гексана от величины растягивающего напряжения при 25 °С. 1 - расчет по формулам теории прочности. 2– расчет по теории гомогенной нуклеации.

В шестой главе диссертации рассмотрены некоторые вопросы распада перегретой и растянутой жидкости в процессе вскипания после образования критических пузырьков. Экспериментально измерена скорость роста пузырьков в перегретом этиловом спирте при отрицательных давлениях в жидкости. На рис.17 показаны результаты опытов. Предложена модель роста закритических пузырьков пара в перегретой растянутой жидкости.

Полученные в работе экспериментальные и теоретические результаты удовлетворительно согласуются между собой. Из результатов работы следует, что скорость роста пузырьков малого размера в перегретой растянутой жидкости определяется внешним давлением и не зависит от

давления пара на линии равновесия. Следовательно, при росте пузырьков в перегретой растянутой жидкости давление пара в них существенно меньше равновесного.

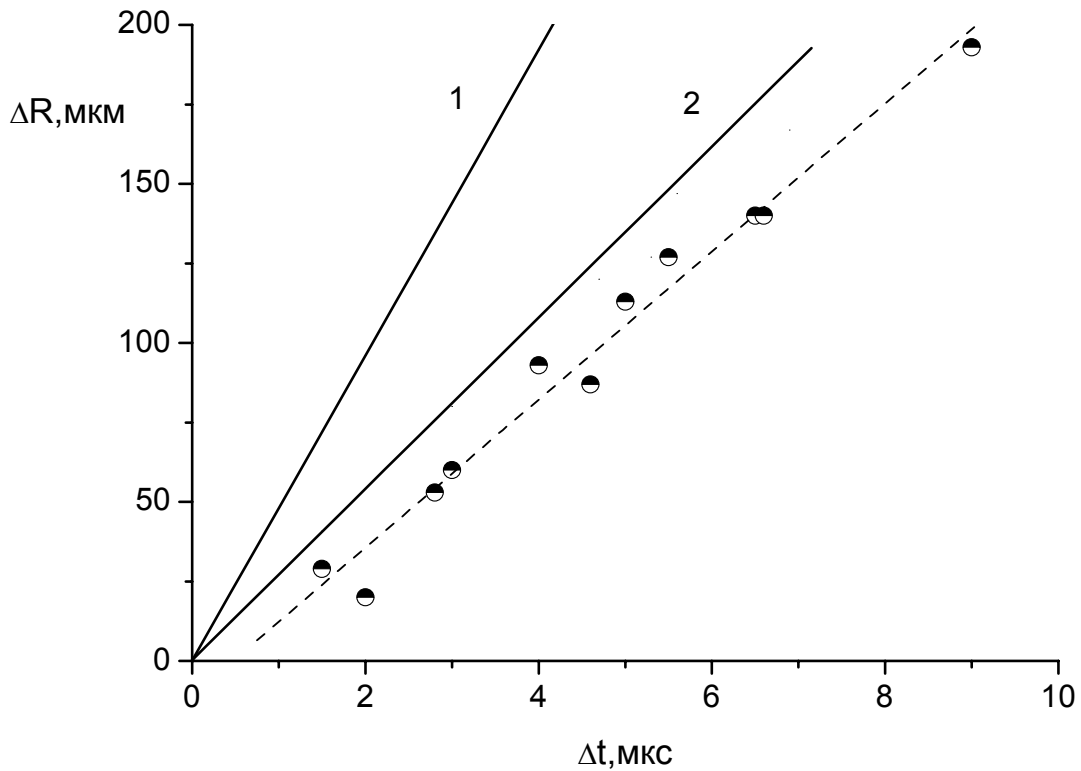


Рис.16. Зависимость прироста радиуса пузырька от времени наблюдения.

Точки – эксперимент.

Сплошные линии расчет: 1 – по формуле Релея; 2- по формуле, предложенной в работе; штриховые линии – аппроксимация экспериментальных данных.

Экспериментально с помощью фото и киносъемки изучен распад струй перегретой воды, истекающей в атмосферу через короткое сопло диаметром 0.8 мм. В области температур ниже 150 °С на расстоянии 10-15 см от сопла наблюдались сплошные нераспавшиеся струи перегретой жидкости. При температурах 150-170 °С было обнаружено, что истечение сплошных струй чередуется с истечением струй, вскипающих сразу в нескольких

местах в пределах поля фотографирования (~ 15 см)(рис.17). Наблюдается активация вскипания перегретой воды на гетерогенных центрах кипения в результате возбуждения в струе перегретой жидкости акустических колебаний растущим пузырьком пара.

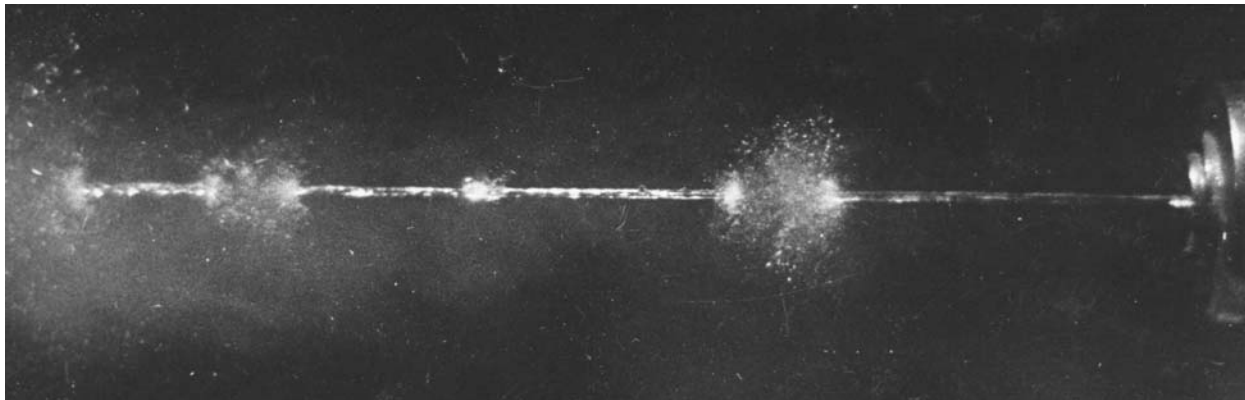


Рис.17. Распад струи воды.

$$T = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}, P_0 = 0,8 \text{ МПа}, L_{\text{струи}} = 15 \text{ см.}$$

Изучен кавитационный распад жидкого н-пентана в трубках Бергло. Последовательно прослежены стадии возникновения, роста и разрушения кавитационных пузырьков в трубке Бергло. Показано, что на начальной стадии растут сферические пузырьки, которые затем разрушаются в результате вызванных его ростом акустических колебаний жидкости. Процесс разрушения пузырьков сопровождается рождением новых пузырьков по всей длине ампулы. Наряду с процессом разрушения пузырька в результате колебаний жидкости возникают новые пузырьки по длине ампулы. Механизм зарождения вторичных пузырьков до конца не ясен. Можно предположить, что их появление вызвано колебаниями жидкости и ампулы в результате возникновения первичного пузырька.

Исследовано рождение кавитационных пузырьков при отражении короткой волны давления от воздушных и паровых пузырей в воде и н-пентане.



а

б

в

Рис.18. Отражение волны давления от воздушных пузырей в н- пентане.

а - амплитуда импульса давления $P=9$ МПа, $\tau=10$ мкс;

б - $P=11$ МПа, $\tau=10$ мкс; в - $P=11$ МПа, $\tau=20$ мкс.

На рис.18 показаны фотографии воздушного пузыря в н-пентане при прохождении через него импульса давления. Направление движения импульса давления снизу вверх. Диаметр пузыря на фотографиях 7 мм. Фотографии *а* и *б* сделаны через 10 мкс после отражения волны давления от передней кромки пузыря. Фотография *в* получена через 20 мкс после прохождения импульса давления через переднюю кромку пузыря. (Над пузырем видно большое количество кавитационных пузырьков, образовавшихся после отражения импульса давления от свободной поверхности н-пентана). Проведенные опыты показали, что при прохождении коротких импульсов давления через жидкость с полостями, имеющими акустическое сопротивление меньше чем основная жидкость, вблизи этих полостей могут рождаться кавитационные пузырьки, если амплитуда импульса давления по абсолютной величине превышает кавитационную прочность жидкости, а размер пузыря превышал длину волны импульса давления.

Заключение

Выполнен комплекс экспериментальных исследований начальной стадии фазового перехода жидкость-пар при вскипании перегретых жидкостей в широкой области давлений от -15 МПа до +6,0МПа и температур от комнатной до $0.9 T_K$ и сделано теоретическое обобщение опытных данных.

Получены следующие основные результаты:

1. Впервые экспериментально исследована кинетика вскипания перегретых диссоциирующих жидкостей. Показано, что вскипание перегретой диссоциирующей жидкости на границе спонтанного вскипания определяется критическими пузырьками равновесного состава.
2. Впервые получены экспериментальные результаты по кинетике вскипания перегретой жидкости при отрицательных давлениях вблизи границы спонтанного вскипания. Показано, что зависимость среднего времени жизни растянутой жидкости от степени перегрева вблизи границы спонтанного вскипания подобны аналогичным зависимостям для вскипания перегретых жидкостей при положительных давлениях.
3. Разработаны новые методы исследования вскипания перегретых жидкостей при отрицательных давлениях. С их помощью впервые получены зависимости температуры предельного перегрева 12 чистых жидкостей и 5 жидких растворов от давления в области отрицательных давлений до -15 МПа.
4. Сделан вывод о применимости классической теории гомогенной нуклеации для описания предельных перегревов жидкостей при отрицательных давлениях до $-(2-3)$ критических давлений.
5. Получены экспериментальные данные по влиянию растворенного в жидкости аргона и углекислого газа на распад струй перегретой воды, расходные и тяговые характеристики коротких сопел при истечении вскипающей воды. Показано, что растворенный в жидкости газ активирует

распад свободных струй перегретой воды, но слабо влияет на тяговые и расходные характеристики сопел вплоть до границы спонтанного вскипания жидкостей.

6. Получены зависимости температуры достижимого перегрева четырехокси азота от растворенного в ней окиси азота. Показано, что спонтанное вскипание газонасыщенного раствора диссоциирующей жидкости определяется критическими пузырьками равновесного состава.

7. Получены зависимости температуры достижимого перегрева при $J = 10^{22} - 10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ растворов углекислого газа в этиловом спирте, гексадекане и воде от концентрации углекислого газа в области отрицательных давлений до -7 МПа. Показано, что зависимости температуры достижимого перегрева растворов этилового спирта с углекислым газом и четырехокси азота с окисью азота имеют вид, характерный для идеальных растворов.

8. Обнаружено подавление центров кавитации в воде углекислым газом и другими легкокипящими примесями в области гетерогенного вскипания растянутой жидкости.

9. Получены результаты по влиянию ионизирующего излучения на кинетику вскипания диссоциирующих жидкостей и хлора. Показано, что в случае диссоциирующих жидкостей вскипание перегретой жидкости под действием излучения происходит на пузырьках неравновесного состава, что объясняется температурной и концентрационной неоднородностью среды на мезоскопическом уровне.

10. Обнаружено, что электрическое поле напряженностью до 10^7 В/см при кратковременном воздействии (до 100 мкс) не способно вызвать преждевременное вскипание растянутой жидкости. Напротив, постоянное электрическое поле вызывает преждевременное вскипание растянутой жидкости уже при напряженностях до $0.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

11. На основе сопоставления основных положений теории гомогенной нуклеации и кинетической теории прочности найдены условия применения

последней для описания результатов по гетерогенному вскипанию перегретых и растянутых жидкостей.

12. Впервые получены экспериментальные данные по скорости роста пузырьков в перегретой растянутой жидкости. Показано, что при росте пузырьков в перегретой растянутой жидкости давление пара в них существенно меньше равновесного.

13. Получены экспериментальные результаты по размножению пузырьков пара в процессе вскипания перегретой и растянутой жидкости. Показано, что первичные пузырьки пара, возникшие и растущие в перегретой и растянутой жидкости, в определенных условиях вызывают процессы размножения пузырьков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Скрипов В.П. Достижимый перегрев четырехокси азота. В кн. Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок. Ч.1. Минск,1976. с.178-184.
2. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Скрипов В.П. Кинетика спонтанного и инициированного гамма-излучением вскипания перегретой диссоциирующей четырехокси азота. Известия АН БССР, серия физико-энергетических наук, 1977, N 1. с.117-121.
3. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Скрипов В.П. Влияние малых добавок окиси азота на достижимый перегрев четырехокси азота. Известия АН БССР, серия физико-энергетических наук, 1977, N 2. с.58-62.
4. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Скрипов В.П. Достижимый перегрев жидкого хлора. Журнал физической химии,1977, т.51, №10. с.2704.(Деп. ВИНТИ рег. N2179-77, 12 с.).

5. Сеницын Е.Н., Виноградов В.Е., Михалевиц Л.А. Теплофизические свойства и достижимый перегрев перфторпропилиодида. ОФТПЭ УНЦ АН СССР, Деп. в ВИНТИ, N 1335-79 Деп. Свердловск, 1979. 11с.
6. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н. Термодинамическое подобие и простая аппроксимация спинодали. В кн. Фазовые превращения и неравновесные процессы. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. с.77-80.
7. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н. Кинетика вскипания перегретой диссоциирующей жидкости. В кн. Метастабильные фазовые состояния при фазовых превращениях. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1980, с.12-19.
8. Сеницын Е.Н., Виноградов В.Е. Аппроксимация спинодали нормальных жидкостей. Теплофизика высоких температур, 1980, т.18, N 5. с.1101-1103.
9. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Виноградов В.Е., Муратов Г.Н. Кинетика вскипания перегретых диссоциирующих жидкостей. В кн. Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС. Минск, 1982. с.30-39.
10. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Котельников Н.А. Влияние недогрева на реактивную силу при истечении вскипающей воды. В кн. Термодинамические свойства метастабильных систем и кинетика фазовых превращений. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1985. с.65-67.
11. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н. Влияние геометрии выходной части сопла на реактивную тягу при истечении вскипающей воды В кн. Термодинамические исследования метастабильных жидкостей. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986, с.83-85.

12. Vinogradov V.E., Sinitsin E.N., Kotelnikov N.A. Effect of Subcooling on the Reaction Force in Discharge of Flashing Water. Fluid Mechanics-Soviet Research, 1987, vol. 16, No. 5, p. 39-41.
13. Vinogradov V.E., Sinitsin E.N., Effect of the Nozzle-Exit Geometry on the Reactive Thrust in the Discharge of a Flashing Water Fluid Mechanics-Soviet Research, 1987, vol. 16, No. 5, p. 57-60.
14. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Скрипов В.П. Расходные и тяговые характеристики потока вскипающей воды при истечении через сопла Лавалья. Теплоэнергетика, 1987, N 6, с.56-57.
15. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н., Разгон потока вскипающей воды в коротких соплах. Теплофизика высоких температур, 1988, т. 26, № 2, с.311-314.
16. Виноградов В.Е., Кусков Г.В., Сеницын Е.Н., Распад струй перегретой воды. ИТФ УрО АН СССР. Деп. в ВИНТИ, N5085-В89, Свердловск, 1989.
17. Виноградов В.Е., Парообразование в потоке вскипающей воды. В кн. Термодинамика метастабильных систем, Свердловск: УрО АН СССР, 1989, с.40-45.
18. Виноградов В.Е., Кусков Г.В., Сеницын Е.Н. Экспериментальное исследование истечения перегретой воды через сопла малого размера. Вопросы атомной науки и техники: Физика ядерных реакторов, 1990, вып. 5, с.43-48.
19. Виноградов В.Е., Сеницын Е.Н. Истечение газонасыщенной воды через короткие сопла. Теплофизика высоких температур, 1991, т.29, № 1, с. 174-177.
20. Виноградов В.Е., Кусков Г.В., Нестационарное истечение вскипающей воды через сопла. В кн. Метастабильные фазовые состояния и кинетика релаксации. УрО РАН., Екатеринбург, 1992, с. 132-136.

21. Виноградов В.Е., Гиззатулина С.В., Синицын Е.Н. Предельные растяжения н-пентана. В кн. Термодинамика и кинетика фазовых переходов. УрО РАН. Екатеринбург, 1992, с. 71-75.
22. Vinogradov V.E., Gissatulina S.V., Sinitsyn YE.N. Maximum Tensile Forces in n-Pentane. Fluid Mechanics Research, 1992, vol.21, No.4, p. 50-54.
23. Виноградов В.Е., Кусков Г.В., Синицын Е.Н. Распад струй газонасыщенной воды. Теплофизика высоких температур, 1994, т.32, №1, с. 72-78.
24. Виноградов В.Е. Экспериментальное исследование вскипания растянутого н-пентана. Труды Первой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.4, с. 54-58.
25. Виноградов В.Е. Экспериментальное исследование кавитации в волне разрежения. В кн. Неравновесные фазовые переходы и теплофизические свойства веществ. Екатеринбург, УрО РАН, 1996, с. 101-111.
26. Виноградов В.Е., Павлов П.А. Вскипание н-пентана в волне разрежения. Теплофизика высоких температур, 1996. т.34, N.1, с.35-39.
27. Виноградов В.Е., Павлов П.А. Рождение кавитационных пузырьков при отражении короткой волны давления от воздушных и паровых пузырей. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып.1. 1997, с. 132-137.
28. Vinogradov V.E., Pavlov P.A. Liquid Boiling-up at negative pressures. Proceeding the International Symposium on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation. Moscow, 1997, p. 57-60.
29. Виноградов В.Е., Павлов П.А. Экспериментальная установка для импульсного перегрева жидкостей в волне разрежения. В кн. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып.2. Екатеринбург: УрО РАН, 1998, с.60-64.

- 30.Виноградов В.Е., Павлов П.А. Импульсный перегрев растворов этилового спирта с водой при отрицательных давлениях. В кн. Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. Том.4. М.: Изд-во МЭИ, 1998, с. 60-63.
- 31.Виноградов В.Е., Павлов П.А. Влияние добавок воды на температуру предельного перегрева спиртов при отрицательных давлениях. В кн. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып.3. Екатеринбург: УрО РАН, 1999, с. 14-19.
- 32.Виноградов В.Е., Павлов П.А. Продолжение границы предельных перегревов в область отрицательных давлений. В кн. Теплообмен ММФ-2000, т.5, Минск, 2000, с. 463-467.
- 33.Виноградов В.Е., Павлов П.А. Граница предельных перегревов н-гептана, этанола, бензола и толуола в области отрицательных давлений. Теплофизика высоких температур, 2000, т.38, №3, с. 402-406.
34. Виноградов В.Е. Граница предельных перегревов водных растворов ацетона в области отрицательных давлений. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 4. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С.33-37.
- 35.Виноградов В.Е., Ижгулов Д.З. Динамика развития паровой полости на проволочном нагревателе в этиловом спирте при отрицательном давлении в жидкости. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 4. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С.72-77.
- 36.Виноградов В.Е. Влияние импульсов электрического поля на перегрев ацетона в области отрицательных давлений. Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 5. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С.100-106.
- 37.Vinogradov V.E., Pavlov P.A. Limiting superheat of aqueous solutions at negative pressures. NATO SCIENCE SERIES: 2:

- Mathematics, Physics and Chemistry. 2002. Volume 84: Liquids Under Negative Pressure. P.13-22.
- 38.Виноградов В.Е., Павлов П.А. Предельный перегрев растворов в области отрицательных давлений. Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 4. М.: Изд-во МЭИ, 2002 г. С. 53-56.
- 39.Vinogradov V.E., Pavlov P.A. Cavitation strength of water solutions// Journal of Engineering Thermophysics, Vol. 11, No. 4, P. 353-363. 2002.
- 40.Виноградов В.Е. Влияние газонасыщения на кавитационную прочность воды// Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 6. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 71-78.
- 41.В.П.Скрипов, В.Е.Виноградов. Сопоставление двух кинетических подходов к долговечности растянутых образцов//Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 87-94.
- 42.Виноградов В.Е. Влияние примесей на кавитационную прочность воды// Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 81-87.
- 43.Скрипов В.П., Виноградов В.Е. Кинетический аспект долговечности растянутых образцов: сопоставление двух подходов. Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т.46, №5, с. 100-105.

Литература.

1. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва. [Препринт ИАЭ-5450/3]. М.: 1991.96 с.
2. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
3. Скрипов В.П., Синицын Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат, 1980.208 с.
4. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000, 435 с.
5. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988, 248 с.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.