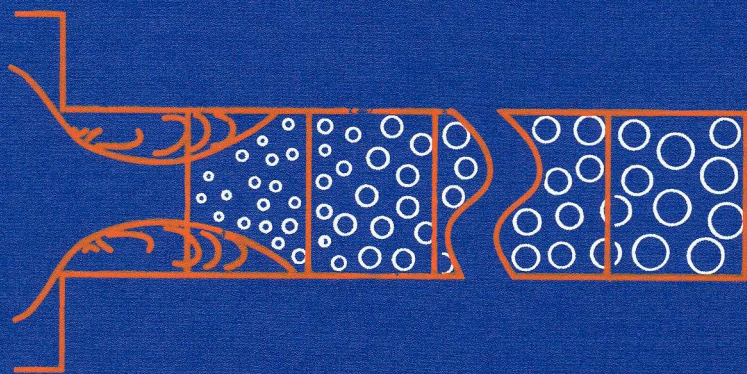


А. А. Долинский
Г. К. Иваницкий

ТЕПЛОМАССООБМЕН
И ГИДРОДИНАМИКА
В ПАРОЖИДКОСТНЫХ
ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО
ВВОДА ЭНЕРГИИ



А.А. ДОЛИНСКИЙ, Г.К. ИВАНИЦКИЙ

ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ПАРОЖИДКОСТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО
ВВОДА ЭНЕРГИИ**

*ПРОЕКТ
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 2008

Изложены основные положения и теоретические предпосылки концепции дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) — принципиально нового подхода к интенсификации тепломассообменных и гидромеханических процессов в жидких гетерогенных средах и к созданию высокоэффективных энергосберегающих технологий. Данный подход базируется на целенаправленном использовании динамических и энергетических эффектов в интенсивно развивающихся парожидкостных системах пузырьковой структуры. Представлены универсальные математические модели, которые с единых термодинамических позиций адекватно описывают динамику единичных пузырьков и пузырьков ансамблей в явлениях взрывного кипения, кавитации и истечения вскипающих потоков. Сравнение результатов расчетов, выполненных в рамках моделей, с известными экспериментальными данными позволило получить большой объем полезной информации и установить новые, не известные ранее, закономерности поведения пузырьков систем, что расширяет представления о природе и характере этих явлений.

Для научных работников, аспирантов, студентов, специализирующихся в области теплофизики и молекулярной физики.

Викладено основні положення та теоретичні засновки концепції дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) — принципово нового підходу до інтенсифікації тепломасообмінних і гідромеханічних процесів у рідких гетерогенних середовищах та до створення високоефективних енергозберігальних технологій. Даний підхід ґрунтується на цілеспрямованому використанні динамічних і енергетичних ефектів у парорідинних системах бульбашкової структури, що інтенсивно розвиваються. Подано універсальні математичні моделі, які з єдиних термодинамічних позицій адекватно описують динаміку одиничних бульбашок і бульбашкових ансамблів у явищах вибухового кипіння, кавітації та витікання закипаючих потоків. Порівняння результатів розрахунків, які виконані у рамках моделей, з відомими експериментальними даними, дозволило отримати великий обсяг корисної інформації й установити нові, не відомі раніше, закономірності поведінки бульбашкових систем, що розширює уявлення про природу і характер цих явищ.

Для наукових співробітників, аспірантів, студентів, що спеціалізуються в галузі теплофізики і молекулярної фізики.

*Видання здійснене за державним контрактом
на випуск наукової друкованої продукції*

Научно-издательский отдел физико-математической
и технической литературы

Редактор *О.А. Микитенко*

ISBN 978-966-00-0773-4

© А.А. Долинский,
Г.К. Иваницкий, 2008

Развитие энергосберегающих технологий, отвечающих современным требованиям производства, базируется на разработке новых концепций, проведении комплексных научных исследований, детальном изучении сущности физических явлений, что определяет возможность целенаправленного управления технологическим процессом и обеспечения оптимальных условий его осуществления. Модификация морально устаревших энергоемких технологических процессов и оборудования для повышения их энергетической эффективности за счет устранения непродуктивных потерь энергии считается одним из перспективных направлений при решении глобальных проблем энергосбережения. Именно здесь кроются основные резервы повышения энергетического потенциала Украины. Выбор и модернизация наиболее распространенных и наиболее энергоемких технологических процессов и операций является одной из первоочередных задач. Примером таких энергозатратных операций могут служить операции, связанные с обработкой жидких многокомпонентных систем. К ним относятся операции перемешивания, гомогенизации, диспергирования, эмульгирования, экстракции, сатурации и другие, которые широко используются практически во всех отраслях народного хозяйства.

Учеными и специалистами ИТТФ НАН Украины — базового научного центра в области теплоэнергетики и технической теплофизики — на основе обобщения многолетнего научного и практического опыта сформулирована концепция нового подхода к интенсификации гидромеханических и тепломассообменных процессов в жидких гетерогенных средах. Этот подход, известный как принцип дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ), предусматривает создание условий рационального использования вводимой в аппарат энергии для выполнения полезной работы и максимального снижения за счет этого непродуктивных потерь. При обработке гетерогенных сред для выполнения полезной работы, направленной на разрушение дисперсий или на ускорение процессов межфазного

тепло- и массопереноса, экономия достигается за счет концентрирования вводимой энергии непосредственно на поверхности отдельной дисперсной частицы, именно там, где необходимо выполнить полезную работу. Выгоднее обеспечить необходимый высокий уровень удельной мощности в малой локальной зоне в окрестности каждой дисперсии, чем создать такой же уровень во всем объеме системы.

Принцип ДИВЭ определяет пути прямого преобразования непрерывно вводимой в аппарат энергии в кратковременные импульсы высокой мощности, дискретно распределенные в рабочем объеме. Для этого в гетерогенной смеси в процессе ее технологической обработки за счет быстрого изменения внешнего давления инициируется формирование, интенсивное расширение, пульсация или схлопывание паровых пузырьков. Эти процессы сопровождаются преобразованием механической энергии в окрестности каждого пузырька с выделением короткого высокоамплитудного импульса давления, что обеспечивает динамическое воздействие на обрабатываемую дисперсную среду. Практическая реализация идеологии ДИВЭ предусматривает инициирование в рабочем объеме обрабатываемой системы таких явлений, как взрывное вскипание, гидродинамическая, акустическая и паровая кавитации, и целенаправленное использование сопутствующих этим явлениям мощных динамических эффектов: высокочастотных осцилляций, сферических ударных волн, кумулятивных микроструй и др.

Изучение различных аспектов поведения развивающихся пузырьковых систем, в первую очередь их динамические характеристики, рассматривается как одно из главных направлений при создании научных основ концепции ДИВЭ.

Исследования тепломассообменных и гидродинамических процессов в пузырьковых системах систематически проводятся в научных лабораториях индустриально развитых стран мира. Непрерывно возрастает количество научных публикаций по данной тематике. Неослабевающий интерес к изучению динамики парожидкостных пузырьковых систем стимулируется растущими потребностями тех отраслей промышленности, где такие системы находят практическое приложение. Это, прежде всего, относится к энергетике, химической, пищевой, фармацевтической и другим отраслям. В последние десятилетия такого рода исследования связаны преимущественно с решением практических задач в ракетной и криогенной технике, в ядерной энергетике, особенно в целях прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций на АЭС. Не менее важными являются проблемы совершенствования работы тепловых насосов, интенсивного охлаждения микроэлектронных приборов и микросхем, предотвращения кавитационного разрушения гидравлических механизмов — насосов, гребных винтов, гидротурбин и т. п. Это те области, где интенсивное развитие пузырьковых систем в явлениях кипения и кавитации играет ключевую роль, и где новые подходы к решению этих проблем могут оказаться плодотворными и полезными.

Наблюдаемая в последние годы тенденция к увеличению фундаментальных исследований в этом направлении отражает потребность промышленности в такой научной информации. Вместе с тем, она свидетельствует о неудовлетворенности исследователей состоянием проблемы в целом.

Нынешнее состояние проблемы можно сформулировать, на наш взгляд, следующим образом. Динамические эффекты, сопровождающие явления взрывного вскипания или кавитации, определяются спецификой протекания внутренних процессов в отдельном пузырьке — единичном элементе сложной пузырьковой структуры. Теплообменные и гидродинамические процессы, обеспечивающие высокие динамические характеристики пузырьков, протекают в наносекундном временном масштабе и наибольшее влияние оказывают на стадии максимального сжатия пузырьков, когда их размеры измеряются в масштабе микрометров. Это затрудняет возможность экспериментального исследования даже при использовании современных методов измерения. Поэтому анализ экспериментов по исследованию динамики пузырьков не возможен без привлечения методов математического моделирования, и степень достоверности полученной информации определяется степенью достоверности используемых моделей и корректностью принятых допущений. Аналитические методы, предполагающие возможность строгого решения совокупности сложных уравнений, оказываются непригодными из-за необходимости привлечения большого числа ограничивающих допущений. Упрощенные модели, используемые при анализе конкретных экспериментов, и полученные на их основе соотношения совершенно не применимы для описания общих закономерностей изучаемых явлений. Очевидным выходом из этой ситуации является применение методов численного моделирования с учетом всех определяющих физических факторов и с использованием минимального числа ограничивающих допущений. Интенсивное развитие компьютерных технологий открывает путь к получению доступной и достоверной информации при изучении самых сложных систем и быстропротекающих процессов. Такой подход создает неограниченные возможности для изучения особенностей физических механизмов ДИВЭ, которые базируются на эффектах динамического воздействия пузырьков.

Несмотря на большое число публикаций по этим вопросам, до сих пор отсутствуют математические модели, которые обеспечивали бы одинаково точное прогнозирование поведения пузырька в широком интервале изменения режимных параметров. В силу исторически сложившихся традиций такие явления, как гидродинамическая, акустическая и паровая кавитации, объемная конденсация, кипение, взрывное вскипание и т. д. рассматриваются как принципиально различные разделы теплофизики. С физической точки зрения все эти явления определяются процессами релаксации парожидкостной пузырьковой системы к термодинамически равновесному состоянию. Поведение пу-

зырьков в этих явлениях подчиняется одним и тем же закономерностям и должно описываться одними и теми же уравнениями, но при разных начальных условиях. При анализе механизмов ДИВЭ, обусловленных спецификой поведения пузырьков в этих явлениях, полезно иметь физически непротиворечивую модель, которая без дополнительных ограничений с одинаковой точностью могла бы предсказать поведение системы при любых условиях.

Очевидно, что понимание специфических особенностей механизмов ДИВЭ и умение направленно и эффективно воздействовать с помощью этих механизмов на характер протекания той или иной технологической операции может быть достигнуто только на основе детального изучения физической природы процессов, протекающих на молекулярном и атомарном уровнях. Эти обстоятельства обуславливают необходимость построения надежного физического фундамента этой концепции и создания строгих теоретических основ принципа ДИВЭ.

В рамках выполнения этой программы проведено термодинамическое и теплофизическое обоснование концепции, выполнена классификация механизмов ДИВЭ и установлены базовые критерии эффективности этих механизмов. С учетом основополагающей роли динамически развивающихся пузырьков структур в концепции ДИВЭ, и того обстоятельства, что динамика отдельных пузырьков и пузырьков ансамблей определяет специфический характер всех механизмов ДИВЭ, выполнен большой комплекс аналитических исследований тепломассообменных и гидродинамических процессов в парожидкостных пузырьков системах. При проведении исследований процессы кипения, кавитации, истечение адиабатно вскипающих потоков впервые рассматриваются с единых термодинамических позиций как один и тот же процесс в различных режимных условиях. Поведение пузырьков и пузырьков структур в этих процессах описывается общей универсальной математической моделью, учитывающей особенности трансформации энергии и специфику протекания микро- и наномасштабных процессов на межфазной границе. Модель разработана на основе строгого анализа совокупности термодинамических неравновесных процессов, контролирующих поведение пузырьков в процессе релаксации парожидкостной системы к термодинамически равновесному состоянию. При создании модели учтены преимущества и недостатки известных в литературе моделей динамики пузырька.

Аналитические исследования, проведенные на базе такого подхода, позволили обнаружить и обосновать новые неизвестные ранее закономерности поведения пузырьков и пузырьков структур в указанных процессах.

Фундаментальные исследования динамики пузырьков структур, на которых базируются теоретические и теплофизические положения концепции ДИВЭ, а также результаты этих исследований являются актуальными и важными как с научной точки зрения, так и в плане их практического использования.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	9
ГЛАВА 1. Основные положения принципа дискретно-импульсного ввода энергии	11
1.1. Анализ традиционных методов интенсификации	13
1.2. Особенности интенсификации гидромеханических и теплообменных процессов	15
1.3. Непроизводительные энергозатраты, связанные с интенсификацией технологических процессов	18
1.4. Основные факторы, определяющие интенсификацию массообменных и гидромеханических процессов	22
1.5. Преимущества импульсного и дискретного ввода энергии в аппарат	25
1.6. Альтернативные подходы к интенсификации теплообменных и гидродинамических процессов в дисперсных средах	28
1.6.1. Концепция локальной изотропной турбулентности	28
1.6.2. Концепция дискретно-импульсного ввода энергии	31
1.7. Основные механизмы дискретно-импульсного ввода энергии	33
1.7.1. Эффекты, связанные с ускоренным движением непрерывной фазы	34
1.7.2. Действие сдвиговых напряжений	37
1.7.3. Кавитационные механизмы	38
1.7.4. Механизм взрывного вскипания	39
1.7.5. Коллективные эффекты в ансамбле пузырьков	40
1.7.6. Возмущение межфазной поверхности в газожидкостных пузырьковых средах	41
1.8. Трансформация энергии в механизмах дискретно-импульсного ввода энергии	43
1.9. Термодинамическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии	45
1.10. Критерии эффективности механизмов дискретно-импульсного ввода энергии	51

1.11. Энергетические аспекты использования принципа дискретно-импульсного ввода энергии.....	55
1.12. Преимущества аппаратов дискретно-импульсного ввода энергии с точки зрения энергосбережения.....	58
1.13. Заключение.....	60
ГЛАВА 2. Математическая модель динамики единичного парогазового пузырька.....	64
2.1. Использование методов математического моделирования при исследовании динамики пузырьков.....	65
2.2. Основные положения модели.....	73
2.3. Уравнение движения.....	75
2.4. Физическая интерпретация уравнения Рэлея.....	79
2.5. Давление в жидкости на границе с пузырьком.....	82
2.6. Движение поверхности пузырька.....	84
2.7. Давление и плотность парогазовой среды внутри пузырька.....	85
2.8. Температура пара внутри пузырька.....	88
2.9. Тепло- и массоперенос через межфазную поверхность.....	88
2.10. Перенос теплоты в жидкой фазе.....	92
2.11. Температурное поле в окрестности осциллирующего пузырька.....	95
2.12. Изменение внешнего давления.....	107
2.13. Учет теплофизических параметров.....	109
2.14. Поле скоростей в жидкости в окрестности пузырька.....	114
2.15. Поле давлений в окрестности пузырька.....	114
2.16. Основные уравнения модели.....	115
ГЛАВА 3. Исследование динамики парового пузырька в процессах кипения.....	119
3.1. Анализ теоретических исследований процессов кипения.....	119
3.2. Анализ экспериментов по динамике пузырька при вскипании слабо перегретых жидкостей.....	138
3.3. Рост пузырька в условиях кипения сильно перегретых жидкостей. Взрывное вскипание.....	150
3.3.1. Анализ эксперимента по взрывному вскипанию перегретых капель.....	152
3.4. Заключение.....	160
ГЛАВА 4. Исследование динамики пузырьков в процессах гидродинамической и паровой кавитации.....	161
4.1. Состояние проблемы.....	161
4.2. Анализ экспериментальных данных по динамике парового пузырька в процессах гидродинамической кавитации.....	166
4.3. Схлопывание пузырьков с перегретым паром в недогретой жидкости.....	176
4.3.1. Исследование влияния режимных параметров на динамику пузырька.....	180
4.3.2. Тепло- и массоперенос через межфазную поверхность при схлопывании пузырька.....	187
4.3.3. Динамика кавитационного пузырька в присутствии постороннего газа... ..	190

4.4. Поступательное движение осциллирующих пузырьков в процессах кавитации	195
4.4.1. Уравнение движения пузырька	196
4.4.2. Взаимодействие пульсирующих пузырьков в процессе паровой кавитации	199
4.4.3. Схлопывание кавитационных пузырьков вблизи твердой поверхности	207
ГЛАВА 5. Динамика паровых пузырьков в акустическом поле	213
5.1. Динамика парового пузырька в жидкости вблизи ее точки кипения при воздействии акустического поля	217
5.2. Динамика паровых пузырьков в холодной жидкости под действием акустического поля	224
5.3. Взаимодействие пульсирующих пузырьков в акустическом поле	232
5.4. Критерий разрушения кавитационных пузырьков	246
5.4.1. Гидродинамическая кавитация	251
5.4.2. Паровая кавитация	255
5.4.3. Акустическая кавитация	259
ГЛАВА 6. Математическое моделирование динамики ансамбля паровых пузырьков	264
6.1. Состояние проблемы	264
6.2. Динамика пузырька в ансамбле в приближении ячейечной модели	269
6.3. Модификация ячейечной модели	274
6.4. Моделирование течения жидкости в межпузырьковом пространстве динамически развивающегося ансамбля	278
6.5. Анализ результатов расчета	283
6.5.1. Динамика роста и схлопывания пузырьков в ансамбле	284
6.5.2. Поле скоростей и давлений в межпузырьковом пространстве	288
ГЛАВА 7. Моделирование течения парожидкостных потоков пузырьковой структуры	292
7.1. Состояние проблемы	293
7.1.1. Равновесные модели	294
7.1.2. Неравновесные модели	296
7.1.3. Анализ неравновесных моделей	299
7.2. Модель истечения адиабатно вскипающей жидкости	305
7.2.1. Основные положения модели	305
7.2.2. Нестационарное истечение	308
7.2.3. Стационарное истечение	315
ГЛАВА 8. Аналитическое исследование истечения вскипающих потоков	317
8.1. Нестационарное истечение вскипающей жидкости	317
8.2. Стационарное истечение вскипающей жидкости	328
8.3. Учет относительного движения паровой фазы во вскипающих потоках	336
8.4. Критический режим течения	341
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	350

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

ДОЛИНСЬКИЙ Анатолій Андрійович
ІВАНИЦЬКИЙ Георгій Костянтинович

**ТЕПЛОМАСООБМІН
ТА ГІДРОДИНАМІКА У ПАРОРІДИННИХ
ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ
ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСНОВИ
ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО
ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

(Російською мовою)

Київ, Науково-виробниче підприємство
«Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2008

Оформлення художника *І.Р. Сільман*
Художній редактор *І.Р. Сільман*
Технічний редактор *Г.М. Ковальова*
Коректор *Л.Г. Бузіашвілі*
Комп'ютерна верстка *О.О. Балюк*

Підп. до друку 23.09.2008. Формат 60×90/16. Папір офс.
№ 1. Гарн. Таймс. Друк. офс. Ум. друк. арк. 24,0. Ум.
фарбо-відб. 24,0. Обл.-вид. арк. 24,10. Тираж 300 прим.
Зам. № 8—720

НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України»
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 2440 від 15.03.2006.
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

03680 Київ 680, вул.Шутова, 13^б
ПП«Видавництво “Фенікс”»