

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

На правах рукописи

БОШКОВА Ирина Леонидовна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ КАНАЛАХ С УЧЕТОМ
ПОТЕРЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.05 - теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1995

ДВ 32.013

Работа выполнена в Одесской государственной академии холода

- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Л.Г. Калинин
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор С.И. Барсуков
- кандидат технических наук, профессор В.П. Онищенко
- Ведущая организация - НИИ "Шторм", г. Одесса

Защита состоится " 27 " марта 1995 года в 11 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одесской государственной академии холода по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОГАХ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ.

Автореферат разослан " 20 " февраля 1995 года.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00754438 (V)

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук, профессор

Р.К. Никольшин

Исх. № от

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При разработке новых электротехнических устройств, для обеспечения теплового режима которых эффективно применение жидкостного охлаждения с поверхностным кипением теплоносителя, требуется достоверная информация о сопутствующих теплообмену процессах, способных нарушить устойчивость работы системы. Накопленный ранее материал относительно механизмов возникновения теплогидродинамических неустойчивостей различных типов используется при проектировании современных систем охлаждения. Имеющиеся критерии устойчивости позволяют определить условия возникновения гидродинамической неустойчивости Ледингега, предсказать кризисы кипения и перераспределение потоков в параллельных каналах. Неучет термоакустических явлений может, однако, поставить под сомнение проектные расчеты, проводимые для оборудования с высокой мощностью тепловыделений. В случае акустической неустойчивости данные ограничены и противоречивы, несмотря на то, что в последнее время интерес к исследованию механизма генерации термоакустических колебаний значительно возрос. Имеется обширный экспериментальный материал, полученный на различных стендах Б.М.Дорофеевым, Е.И.Четвериковым, В.А.Ассманом, В.И.Герлигой, В.В.Зродниковым и др. Известны подходы к теоретическому объяснению механизма генерации колебаний звуковой частоты пузырьками пара, представленные Хаямой, Е.И.Несисом и С.Е.Несисом, Б.М.Дорофеевым и др. Однако, имеющиеся физические и созданные на их основе математические модели решали частные задачи и не позволяли получать амплитудно-частотные характеристики звуковой волны на основании исходных данных по тепловому и гидродинамическому режиму. Модель, наиболее полно описывающая механизм генерации термоакустических колебаний, требует апробации опытом и учета диссипативных эффектов.

Таким образом, актуальность работы определяется ее непосредственной связью с проблемами и потребностями, порожденными научно-техническим прогрессом в теплотехнике на современном этапе.

Предметом предлагаемых к защите исследований являются колебания давления звуковой частоты, возникающие при кипении недогретой жидкости в каналах малого диаметра, и их моделирование с учетом диссипации энергии. Моделирование термоакустических явлений способствует более глубокому пониманию причин возникновения акустической

волны с гармонической формой колебаний и образования стоячих волн конечной амплитуды в канале. При правильном представлении механизма генерации звука появляется возможность расчетным путем определять области режимных параметров, в которых амплитуда колебаний давления звуковой волны становится недопустимо высокой. Расчетный метод как метод прогнозирования явлений термоакустики дает возможность значительно сократить затраты материальных и трудовых ресурсов, кроме того, он позволяет определять все возможные случаи роста звукового давления, которые в силу каких-либо причин не фиксируются на конкретном экспериментальном стенде, но могут проявиться при незначительном отклонении от условий проведения эксперимента.

Цель работы заключается в исследовании механизма генерации термоакустических колебаний (ТАК) в каналах малого диаметра с поверхностным кипением жидкости, движущейся с высокими недогревами, и моделирование явлений термоакустики в охлаждаемых каналах с учетом диссипативных потерь.

Основные задачи работы состоят в следующем:

1. Выбор математической модели генерации ТАК и апробация ее на имеющихся экспериментальных данных с целью корректировки входящих в нее зависимостей.
2. Анализ механизмов диссипации энергии и учет наиболее существенных из них в частотном уравнении.
3. Оценка влияния диссипативных членов на амплитудно-частотные характеристики колебаний.
4. Определение области применения модели на основании сравнительных характеристик машинного и физического эксперимента.

На защиту выносятся научное положение и основные результаты диссертации.

Научное положение: в условиях поверхностного кипения жидкости, движущейся с высокими недогревами в каналах, при малых значениях паросодержания ($\varphi < 0.1$) основными механизмами потерь энергии термоакустических колебаний являются вязкостная диссипация в парожидкостном столбе канала и потери энергии на открытых концах канала.

Основные научные результаты:

1. Создан комплекс программ расчета амплитуды колебаний давления в канале с учетом потерь механической энергии для оценки вклада диссипативных эффектов при различных условиях и определения возмож-

- ных областей значительного повышения амплитуды звукового давления.
2. Получены коэффициенты потерь акустической энергии, связанные с вязкостью и проводимостью открытых концов канала.
 3. Сопоставлены амплитудно-частотные характеристики, полученные экспериментально и расчетным путем по зависимостям модели генерации термоакустических колебаний.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые был проведен полномасштабный расчет термоакустических колебаний в каналах при заданных тепловых и гидродинамических параметрах процесса охлаждения, с учетом диссипативных потерь; показана применимость выбранной гидродинамической модели развития ТАК для прогнозирования резонансных явлений в канале с кипящим теплоносителем.

Практическая ценность результатов и выводов диссертации определяется их использованием для повышения надежности новых видов энергооборудования, обеспечение теплового режима которых осуществляется с помощью жидкостного охлаждения.

Результаты работы внедрены НИИ "Шторм" г. Одесса в виде комплексной программы расчета амплитудно-частотных характеристик колебаний в каналах охлаждения AMPLI, которая находится в фонде института и может быть использована при проектных расчетах новых устройств.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы доложены на XV научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ИТТФ АН УССР (Киев, 1984), IV отраслевой научно-технической конференции (Одесса, 1988), научно-технической конференции молодых ученых и специалистов НИИ "Шторм" (Одесса, 1990), научно-технической конференции Академии холода (Одесса, 1994), Первой Российской национальной конференции по теплообмену, (Москва, 1994).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в пяти печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 82 наименований и приложений. Работа изложена на 107 листах машинописного текста, включая 28 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований механизма генерации термоакустических колебаний в каналах малого диаметра и перспективы моделирования явлений термоакустики; сформулирована цель работы и задачи, требующие решения для достижения поставленной цели. Описаны основные результаты и научная новизна проведенных исследований.

В первой главе анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований акустических явлений в трубах и каналах при поверхностном кипении жидкости, влияние параметров процесса теплообмена на акустические характеристики колебаний. Подробно рассмотрен процесс кипения жидкости при значительных недогревах до температуры насыщения. Приводится анализ зависимостей для расчета величин, определяющих характер акустических колебаний: объемное паросодержание, число центров парообразования, отрывной диаметр пузырька, частота действий центров парообразования. Представлена информация о росте парового пузыря в условиях распространения звуковой волны с целью определения стадии его эволюции, приводящей к возбуждению звуковых волн высокой интенсивности. Пузырек излучает звуковую волну при любом изменении своего объема, однако, в зависимости от условий кипения основной вклад вносит одна из стадий его существования: возникновения, роста, схлопывания или их комбинации. В результате изучения литературных источников получен вывод, что в условиях вынужденного движения теплоносителя в каналах при высоких недогревах наиболее вероятно определяющее влияние стадии коллапса пузырька на генерацию значительного по амплитуде импульса звукового давления. Кроме исследования динамики одиночного пузырька на теплопередающей поверхности, рассматривались коллективные эффекты ансамбля пузырьков. Как свидетельствуют данные кино съемки, в определенных условиях наблюдается синхронизация периодов ожидания, роста и схлопывания пузырьков на соседних центрах парообразования. Это может быть объяснено взаимодействием пузырьков на соседних центрах парообразования и влиянием поля звуковой волны, распространяемой в канале, на процесс генерации паровых пузырьков. В рамках принятой теоретической модели предполагается, что синхронность действия центров кипения главным образом определяется тепловым взаимодействием микроробластей в стенке канала. Тогда повышение амплитуды ТАК естественно рассматривать как проявление резонансных эффектов, а центры кипения - как источники вынужденных колебаний. По представлениям

Хаяма, В.И. Герлиги и др. ТАК - это упругие автоколебания. По мнению Е.И. Несиса - это явления параметрического резонанса. Существуют представления, что синхронизация центров парообразования наиболее вероятна как резонансный эффект: при приближении к области резонанса связанность системы "пузырьки пара - столб жидкости в канале" возрастает.

Существующие физические представления о механизме возникновения звуковой волны в канале, обусловленном процессом кипения, не позволяют однозначно определить закономерности развития термоакустических колебаний. Анализ литературных источников привел к предположению, что возникновение термоакустических колебаний в каналах при наличии границ отражения связано с образованием стоячих волн. В исследуемых условиях, т.е. при высоких недогревах жидкости и малом паросодержании (основной вклад в значение паросодержания вносят пузырьки, находящиеся на поверхности теплообмена), явления повышения амплитуды колебаний давления в канале объясняются сближением вынужденных частот пульсаций пузырьков и собственных частот парожидкостного столба жидкости.

Несмотря на то, что в настоящее время накоплен довольно обширный материал по теоретическому и экспериментальному исследованию термоакустических явлений в канале, полученные данные редко удавалось представить в виде обобщенной математической модели процесса. Имеющийся материал в большей степени носит характер рекомендаций, намечающих возможные математические методы для определения акустических характеристик кипения. Из моделей, построенных на разных физических представлениях о причинах генерации ТАК, автор выбрал гидродинамическую модель В.В. Зродникова, основанную на резонансном характере образования областей с высокой амплитудой колебания давления. Эта модель наиболее полно учитывает расчеты характеристик теплообменного процесса, в частности, частоту образования пузырьков пара, которая определяет вынужденную частоту колебаний звуковой волны. На основе теоретических исследований с помощью выбранной модели удалось объяснить различные экспериментальные факты по частотным характеристикам ТАК. Однако, без учета диссипативных эффектов определить значения амплитуд колебаний не удалось.

Итогом проведенной аналитической работы является обоснование и конкретизация задач развития избранной модели и направлений ее тестирования.

Вторая глава посвящена проблеме моделирования термоакустических явлений в исследуемых условиях. Структурно она состоит из двух разделов, в первом из которых приводится описание математической модели ТАК, полученной после апробации входящих в нее зависимостей на данных физического эксперимента. В основу модели положено предположение о резонансном характере термоакустических колебаний, возникающих в системе с распределенными источниками вынужденных колебаний.

Основные допущения принятой модели следующие:

- движение теплоносителя рассматривается как одномерное;
- перетечки тепла вдоль канала, термическое сопротивление стенки и ее деформации не учитываются;
- объем паровых пузырей меняется по синусо-дальному закону:

$$V(t) = V_{max} \cdot \exp(i \omega t) ; \quad (1)$$

- скорость волны равна скорости звука в неограниченной среде (что всегда выполняемо для трубы с жесткими стенками);
- теплофизические свойства теплоносителя меняются незначительно по длине канала;
- распространение волны не зависит от ориентации оси трубы или степени ее изогнутости.

Последнее предположение справедливо для "очень узких" труб, для которых выполнимо условие: диаметр трубы $d \ll 0.61\lambda$.

Схематично исследуемый парогенерирующий канал приведен на Рис. 1.

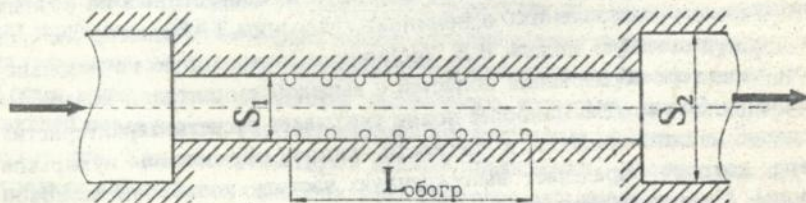


Рис. 1. Схема парогенерирующего канала.

Компьютерная программа, реализующая разработанную модель, позволяет получить частотные характеристики колебаний, распределение звукового давления по длине канала и области режимных пара-

метров, для которых вероятно наступление резонанса и, соответственно, повышение амплитуды колебаний. Однако определить абсолютные значения амплитуды невозможно, так как в модели нет учета диссипативных явлений: в точке совпадения собственной и вынужденной частоты колебаний расчетные зависимости приводили к бесконечному значению амплитуды. Поэтому далее в диссертации проведено исследование основных источников потерь энергии звуковой волны: потери вследствие вязкости и теплопроводности, потери на входе и выходе канала, рассеяние и поглощение звука на пузырьках пара. Вязкостное поглощение колебательной энергии определялось с учетом особенностей распространения волн в релаксирующей среде. При распространении звуковых волн, сопровождающихся сжатием и расширением среды, в жидкости происходят внутренние процессы, стремящиеся восстановить термодинамическое равновесие. Эти процессы сопровождаются диссипацией энергии, интенсивность которой зависит от соотношения между скоростью сжатия и расширения и временем релаксации. Аналитическое выражение для процесса затухания волны предложено Л.Д. Ландау, и заключается в представлении волнового вектора в виде комплексного числа, мнимая часть которого и есть коэффициент поглощения. Основная проблема состояла в определении высокочастотной скорости звука, для чего необходимо было разобраться с механизмом проявления второй (объемной) вязкости на молекулярном уровне.

Т.к. увеличение высокочастотной скорости звука относительно равновесной объясняется одними и теми же механизмами как для жидкого, так и для газообразного состояния вещества, должно выполняться равенство:

$$\left(\frac{C_{\infty}}{C_{\theta}}\right)_V = \left(\frac{C_{\infty}}{C_{\theta}}\right)_L = M \quad (2)$$

Комплекс M на основе такой аналогии определяется отношением полной энергии молекулы, включающей энергию поступательного движения молекул (внешние степени свободы) и колебательных и вращательных движений (внутренние степени свободы), к энергии поступательного движения (внутренние степени свободы при $\omega t \gg 1$ не учитываются). Этот комплекс зависит от температуры и, например, для воды при температуре 20°C $M = 1,018$.

В исследуемых условиях произведение $\omega t < 1$, т.е. область вынужденных колебаний звуковой волны - низкочастотная. Установление равновесия успевает следовать за изменением плотности в звуковой волне.

Учет вязкостной диссипации в математической модели ТАК после определения высокочастотной скорости звука и решения комплексного уравнения позволил получить значение амплитуды колебания давления в точке резонанса:

$$|P|_{\max} = \frac{B}{\operatorname{sh}(\alpha_{\text{внз}k})}, \quad (3)$$

где:

$$B = \rho C_0 \omega V Z \Pi [\sin(k(L-x)) \cdot (\cos(kx) - \cos(kx_n)) - \sin(kx) \cdot (\cos(k(L-x_k)) - \cos(k(L-x)))] / (kS_1) \quad (4)$$

- комплекс, составленный из величин, входящих в соотношение для расчета амплитуды и практически не зависящих (как показал машинный эксперимент) от коэффициента вязкостного поглощения $\alpha_{\text{внз}k}$:

$$\alpha_{\text{внз}k} = \frac{\omega^2 \tau}{2C_0^3} (C_\infty^2 - C_0^2). \quad (5)$$

На следующем этапе были определены зависимости для расчета потерь акустической энергии на концах канала. Для этого в первую очередь был проведен вывод частотного уравнения для трубы с открытыми концами с учетом потерь энергии и получен коэффициент потерь:

$$\alpha_{kp} = \operatorname{arctg}(i\rho C_0 Y) \quad (6)$$

После решения задачи о нахождении проводимости Y стало возможным определить амплитуду колебания давления и ее значение в условиях резонанса:

$$|P|_{\max} = \frac{B}{\operatorname{sh}(\alpha_{kp})} = \frac{B}{\operatorname{sh}\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{S_2 - S_1}{2S_1}\right)\right)} \quad (7)$$

Совместный учет полученных коэффициентов приводит к следующей форме записи амплитуды колебаний:

$$|P| = \frac{B}{\sqrt{\sin^2(kL) + \operatorname{sh}^2(\alpha_{\text{внз}k}L + \alpha_{kp})}} \quad (8)$$

На основе полученных уравнений были составлены программы, позволяющие исследовать в ходе машинного эксперимента степень влияния различных эффектов, приводящих к потерям энергии звуковой вол-

ны. В качестве примера на рис. 2 представлены расчеты, проведенные для натурных каналов с геометрическими параметрами охлаждаемых электронных приборов и реальными режимными параметрами системы охлаждения:

длина канала:	0,667 м
диаметр:	0,04 м
координата начала обогреваемого участка:	0,5 м
координата конца обогреваемого участка:	0,625 м
давление на входе в канал:	$2,2 \cdot 10^5$ Па
температура жидкости на входе:	78 °С
плотность теплового потока:	$1,5 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^6$ Вт/м ²

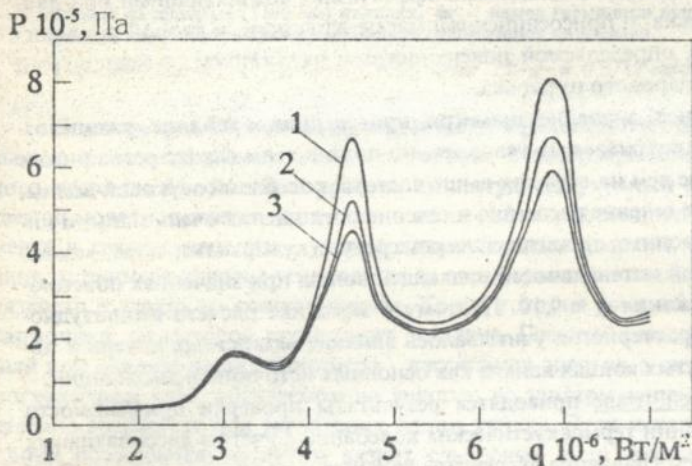


Рис. 2. Расчетные кривые зависимости амплитуды колебаний давления от теплового потока с учетом вязкостной диссипации (1), потерь на концах канала (2) и взаимного влияния диссипативных механизмов (3).

Видно, что вязкостная диссипация вносит меньший вклад, чем концевые потери. Наибольшее влияние коэффициентов диссипации проявляется в околорезонансной области.

Было проведено исследование влияния паровых пузырьков на потери акустической энергии. Поскольку содержание пузырьков в потоке жидкости крайне мало практически во всем диапазоне изменений режимных параметров, целью данного частного исследования было определение резонансной частоты пузырька, т.к. наличие даже небольшого

количества резонансных пузырьков приводит к значительному поглощению и рассеянию энергии.

Таблица 1

Диаметр пузырька d , м	Первая резонансная частота, ω_1 , Гц	Вторая резонансная частота, ω_2 , Гц
$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^7$	$5,66 \cdot 10^7$
$6,3 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^5$
$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^4$	$8,9 \cdot 10^4$

В Табл.1 приведены расчетные значения первой резонансной частоты, которая связана с тепловыми эффектами, возникающими при движении пузырька и присоединенной массы жидкости, и второй резонансной частоты, определяемой поверхностным натяжением, в зависимости от диаметра парового пузырька.

Последнее значение диаметра, приведенное в таблице, уже невозможно в рассматриваемых условиях, но даже в этом случае резонансные частоты более чем на порядок выше частоты колебаний звуковой волны. Как следствие сечение рассеяния и сечение поглощения очень малы; и интенсивность волны, прошедшей через среду с пузырьками пара, можно считать равной интенсивности падающей волны при значениях объемного паросодержания $\phi < 0,10$. Поэтому в методике расчета амплитудно-частотных характеристик учитывалось влияние вязкостных потерь и потеря на открытых концах канала как основных источников диссипации.

В третьей главе приводятся результаты проверки применимости модели генерации термоакустических колебаний с учетом диссипативных эффектов путем сравнения экспериментальных и расчетных данных. Эксперименты были выполнены на различных экспериментальных стендах с каналами круглого сечения большой длины, на коротких каналах при кипении на проволоке и на каналах прямоугольного сечения. Неудовлетворительный результат сопоставления был получен при расчете амплитудно-частотных характеристик колебаний, обусловленных кипением на проволоке, что объясняется различием условий распространения колебаний в реальном канале и модельном представлении.

Хорошая сходимость результатов появлялась при сопоставлении с экспериментами, проведенными на каналах длиной 1200 мм и внутренним диаметром 4 мм. Длина обогреваемого участка составляла 500 мм.

На Рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные кривые, полученные для трех областей, отличающихся значением массовой скорости.

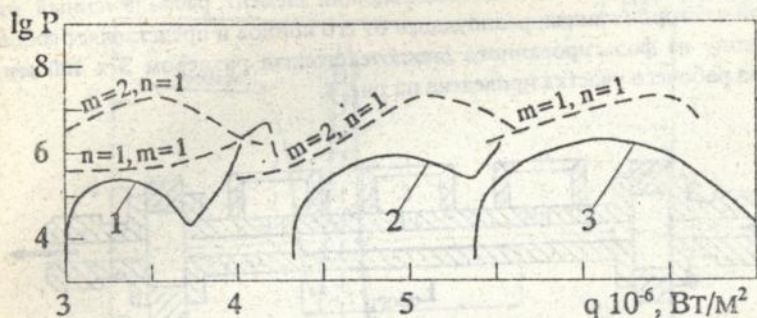


Рис. 3. Экспериментальные (—) и теоретические (---) кривые, полученные на длинных (1200 мм) каналах. m - номер гармоники вынужденных колебаний, n - номер гармоники собственных колебаний.

1 - $\rho \cdot w = 3160 \text{ кг/см}^2$, 2 - $\rho \cdot w = 1535 \text{ кг/см}^2$, 3 - $\rho \cdot w = 6715 \text{ кг/см}^2$.

Для всех трех случаев модель правильно предсказывает области повышения амплитуды колебаний, что говорит о достоверности резонансного подхода. Абсолютный уровень амплитуд, полученный по предлагаемой модели, остается значительно выше зафиксированного в эксперименте в связи с неполным учетом диссипативных явлений, которые в данном примере должны усиливаться за счет большего вклада сдвиговой вязкости и потерь на стенках канала. Кроме того, не учитывается номер гармоники, на которой происходит резонанс. Главный вывод, полученный при анализе данного примера - диссипация энергии в акустическом пограничном слое, образуемом на участке, не занятом кипением, существенно возрастает при увеличении длины канала. Этот механизм диссипации объясняется эффектом вязких сдвиговых волн, возникающих в слое между стенкой канала и движущейся жидкостью. Кроме того предполагается, что энергия звукового импульса, генерируемого ансамблем пузырьков, значительно меньше величины, получаемой по принципу аддитивности. В связи с этим требуется уточнение длительности и интенсивности акустически активного периода пузырька в условиях распространения стоячей звуковой волны и влияния пузырьков, расположенных на соседних центрах парообразования. На других экспериментальных каналах эти эффекты менее заметны и, ввиду того, что на практике в устройствах рассматриваемого типа каналы большой длины встречаются редко, на данном этапе в модели не учитывались эти явления.

Для получения амплитудно-частотных характеристик в условиях, наиболее приближенных к реальным, были проведены эксперименты в каналах прямоугольного сечения. Исследования проводились на канале размером 5 x 3 x 410 мм. Тепловыделяющий элемент, расположенный на одной из сторон канала, равноудален от его концов и представляет собой пластину из фольгированного стеклотекстолита размером 3 x 100 мм. Схема рабочего участка приведена на рис. 4.

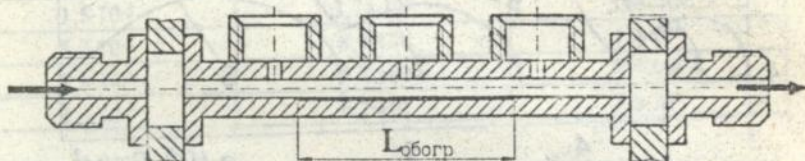


Рис. 4. Схема рабочего участка.

В качестве примера расчета на рис.5 приведены зависимости, полученные для следующих условий:

- давление на входе в канал: $2 \cdot 10^5$ Па
- давление на выходе из канала: $1,95 \cdot 10^5$ Па
- температура на входе в канал: 60°C
- скорость потока воды: 3 м/с
- плотность теплового потока: $(4 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^6)$ Вт/м²

Расчет показывает резонансное повышение амплитуды колебаний для первой и второй гармоники собственных колебаний и первой - вынужденных. Максимальное значение амплитуды - $5,53 \cdot 10^5$ Па. Второй резонанс (точка В) значительно меньше по величине из-за падения скорости звука (что также приводит к увеличению коэффициента вязкостных потерь) и частоты собственных колебаний парожидкостного столба. Сопоставление по частотам в расчете и эксперименте дает удовлетворительные результаты. Расчетная частота основного тона с максимальной погрешностью 15 % совпадает с экспериментальной. Гармоники высших порядков, предсказываемые теоретической моделью, также подтверждаются экспериментом. Распределение давления по длине канала соответствовало первой моде колебаний в области, близкой к резонансу на первых гармониках, что также подтверждается экспериментально.

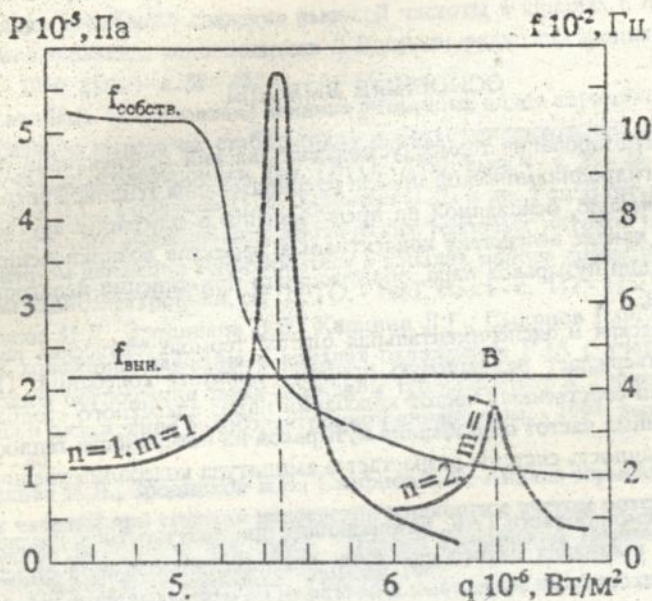


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики колебаний звукового давления в прямоугольном канале. $f_{\text{внн}}$ - частота вынужденных колебаний, $f_{\text{собств}}$ - частота собственных колебаний.

Таким образом, на основании результатов выполненных исследований впервые создана методика расчета амплитудно-частотных характеристик с учетом диссипативных потерь, позволяющая определить области резонанса и абсолютный уровень амплитуды колебаний в этих областях в практически важных случаях, описываемых теоретической моделью. Для дальнейшего улучшения методики расчета амплитудно-частотных характеристик требуется получение более точных данных о процессе генерации звука пузырьками пара при действии на них колебаний давления волны в канале и соседних центрах парообразования. Кроме того, все полученные здесь зависимости могут быть обобщены для других теплоносителей. В первую очередь перспективными представляются бинарные смеси на основе этиленгликоля. В настоящее время автором получены только полуэмпирические зависимости для определения кризиса теплообмена и изучены особенности кипения бинарных смесей в каналах малого диаметра. Распространение волн в кипящих смесях происходит со значительно большим влиянием диссипативных эффектов, что подчеркивает перспективность дальнейшего развития основных положений настоящей работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для прогнозирования термоакустических явлений перспективно применение гидродинамической модели преобразования тепловой энергии в акустическую, основанной на представлении о генерации звуковой волны в канале вследствие коллективных эффектов возникновения и конденсации пузырьков пара, образующихся при кипении недогретой жидкости.
2. Теоретическая и экспериментальная оценка термоакустических явлений подтверждает резонансную природу усиления колебаний. При сближении собственных частот колебаний парожидкостного столба и вынужденных частот образования пузырьков на поверхности теплообмена связанность системы возрастает и амплитуда колебаний увеличивается.
3. В исследуемой области ТАК, возникающих при поверхностном кипении жидкости в каналах малого диаметра, диссипативные потери определяются вязкостными эффектами и потерями на открытых концах канала.
4. Резонансная частота пузырька в потоке отличается по порядку величины от частоты колебания звуковой волны, в связи с этим энергия, рассеиваемая пузырьками пара, пренебрежимо мала. Рассеяние и поглощение энергии пузырьками пара не проявляется в области малых значений паросодержания, которые характерны для изучаемых режимов кипения недогретой жидкости.
5. Полученная математическая модель генерации термоакустических колебаний в каналах с учетом различных механизмов потерь энергии позволяет определить уровень амплитуды звуковых колебаний в околорезонансной области, необходимый для проведения проектных расчетов систем охлаждения РЭС.
6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало адекватность принятой математической модели процесса генерации ТАК с учетом диссипации энергии акустическим явлениям, наблюдаемым в исследуемых каналах.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Зродников В.В., Бошкова И.Л. Математическое исследование процесса генерации колебаний давления высокой частоты в каналах с поверхностным кипением теплоносителя // Вопросы радиоэлектроники, сер. ОВР. - 1990, вып.4 - с. 39 - 45.
2. Бошкова И.Л. Исследование влияния различных видов неустойчивости двухфазного потока на стабильность работы испарительной СОТР // Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРТО. - 1991, вып. 4 - с. 23 - 28.
3. Калинин Л.Г., Горбунов И.А., Бошкова И.Л. и др. Результаты экспериментального исследования критических тепловых потоков при вынужденном движении теплоносителя в каналах малого диаметра // Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРТО. - 1983, вып.1 - с. 111 - 115.
4. Бошкова И.Л., Зродников В.В., Калинин Л.Г., Смирнов Г.Ф. Амплитуды колебаний давления в каналах охлаждения РЭА с учетом вязкостного поглощения звука в жидком теплоносителе // Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. - 1994, вып. 1 - 2 - с. 37 - 40.
5. Бошкова И.Л., Зродников В.В., Смирнов Г.Ф. Анализ термоакустических явлений при кипении недогретой жидкости с учетом потерь механической энергии. // Тез. докл. Первой Российской Национальной конференции по теплообмену. Москва, 1994.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

C_∞ - высокочастотная скорость звука, C_0 - равновесная скорость звука, d - диаметр парового пузырька, f - частота колебаний, k - волновое число, i - мнимая единица, L - длина канала, l - длина свободного пробега молекул, P - максимальная амплитуда колебаний звукового давления, S_1, S_2 - площадь поперечного сечения канала и соединительного трубопровода, t - время, w - скорость течения жидкости, V - объем парового пузырька, v - скорость частиц в звуковой волне, x - текущая координата, x_0 - координата начала кипения, x_k - координата конца обогреваемого участка, Y - проводимость, Z - число центров парообразования, $\alpha_{\text{вж}}$ - коэффициент вязкостной диссипации энергии, α_p - коэффициент потерь на концах канала, λ - длина волны, ρ - плотность жидкости, τ - время релаксации, ω - круговая частота вынужденных колебаний, Π - отношение площади канала, на которой происходит кипение, к общей площади поверхности канала.

АНОТАЦІЯ

Бошкова І.Л. Моделювання термоакустичних явищ у парогенеруючих каналах з урахуванням втрат механічної енергії. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.05 - теоретичні основи теплотехніки, Одеська державна академія холоду, Одеса 1995.

Захищаються 5 наукових праць, які вміщують результати досліджень процесу генерації термоакустичних коливань у каналах малого діаметру при розвиненому поверхнім кипінні теплоносія. Аналіз механізмів дисіпації вказує на те, що основний внесок дають втрати, зв'язані з проявленням зсувової та об'ємної в'язкості, та втрати на кінцях каналів. Одержані коефіцієнти в'язкостної дисіпації та кінцевих втрат. Проведене порівняння експериментальних значень амплітудно-частотних характеристик та значень, передбачених моделлю.

Ключові слова: *неустійчивість, термоакустика, кипіння, дисіпація енергії, резонанс.*

SUMMARY

Boshkova, I.L. Modelling of Thermoacoustic Phenomena in Vapour-Generating Channels Including Mechanical Energy Losses. Candidate of Technical Sciences Thesis in the speciality 05.14.05 -Theoretical Fundamentals of Thermal Engineering.

5 scientific papers are presented for consideration, which contain the results of the study of the thermoacoustic oscillation generation process in channels of small diameters at developed surface boiling of working substance. The analysis of the energy dissipation mechanisms shows that the main contribution is due to the losses caused by viscosity and to the losses at the channel ends. The coefficients of viscosious dissipation and of channel ends losses have been obtained. Comparison is made of the experimental data on amplitude-frequency characteristics and of ones predicted by the developed model.

Key words: *instability, thermoacoustic, boiling, energy dissipation, resonance.*

Bozhkova

г. Одесса, роталпринт ОГАХ. Подписано и печати 15.02.95
Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 208-95

448064

AB 32.013

AB 32.013