

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ РЕЖИМНЫХ И МАСШТАБНЫХ ОБЛАСТЕЙ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Канд. техн. наук, доц. КОРОЛЕВ А. В.

Одесский государственный политехнический институт

Появившиеся в последнее время научные публикации, предупреждающие о возможности появления в активной зоне реактора типа ВВЭР такого явления, как термоакустические колебания (ТАК), вновь требуют внимательного изучения этого явления во всех его проявлениях.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение границ области термоакустических колебаний на физической модели.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой замкнутый контур, выполненный из нержавеющей стали 08X18H9T.

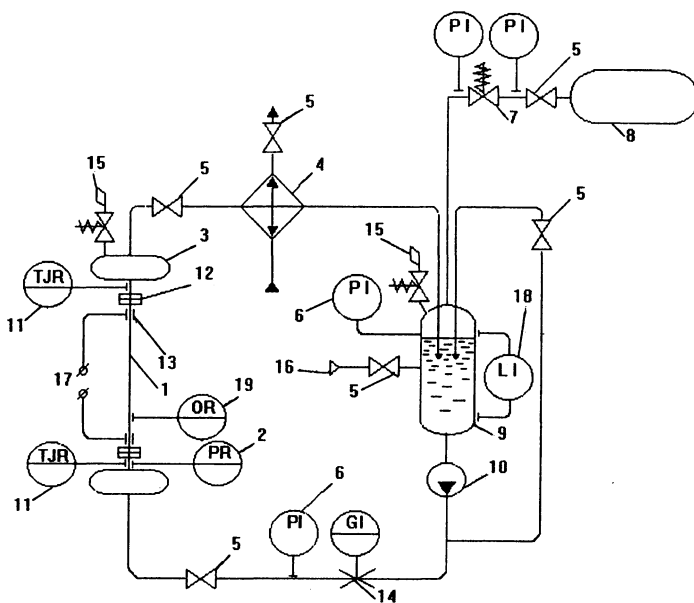


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – рабочий канал; 2 – датчик давления; 3 – емкости акустической развязки канала; 4 – охладитель; 5 – регулирующие вентили; 6 – показывающие манометры; 7 – редуктор; 8 – газовый баллон; 9 – компенсатор объема; 10 – насос; 11 – термопары; 12 – токоразделительные фланцы; 13 – клеммы токоподвода; 14 – расходомер; 15 – предохранительный клапан; 16 – заправка стенда водой; 17 – подключение силового трансформатора; 18 – уровнемер; 19 – пьезодатчик (акустический)

Рабочее давление в контуре поддерживается системой компенсации объема, которая включает в себя емкость с газовой подушкой, газовый редуктор давления и баллон высокого давления с аргоном. Требуемое давление в контуре регулируется настройкой редуктора, а подача газа осуществляется выше уровня воды, допускаемого в емкости. Для защиты стенда от превышения давления имеются два предохранительных клапана.

Температура теплоносителя на входе в рабочий канал поддерживается охлаждением в теплообменнике с помощью вентиля, регулирующего расход охлаждающей воды.

Циркуляция воды в контуре производится с помощью бессальникового насоса типа ЦНГ, обеспечивающего максимальный напор 0,5 МПа при давлении в корпусе до 5 МПа. Для обеспечения устойчивой работы насоса его заборный патрубок размещен непосредственно под днищем компенсатора объема. Регулировка расхода воды на рабочий канал осуществляется вентилем на байпасной линии на выходе из насоса (рис. 1). Для предотвращения аэрации контурной воды сбросы из байпасной линии и выхода канала выполняются под уровень воды. Для возможности принудительной газификации воды в контуре предусмотрена линия, подключаемая к источнику газа высокого давления.

Рабочий канал представляет собой трубку длиной 1 м из стали 08Х18Н9Т четырех типоразмеров: $\varnothing 3,25 \times 0,25$; $\varnothing 6,0 \times 1,0$; $\varnothing 10 \times 1,0$; $\varnothing 12 \times 1,0$.

Использование канала большего размера ограничивалось мощностью сварочного агрегата, обогревающего его в режиме короткого замыкания. Обеспечение акустической изоляции (развязки) последнего осуществляется установкой на его входе и выходе емкостей объемом по 10 л.

Для визуализации процесса, а также исследования особенностей развития ТАК в случае внешнего обтекания выполнен коаксиальный канал с шириной зазора 3,5 мм. Внешний диаметр канала определяется кварцевой трубкой $\varnothing 20 \times 1,5$, а внутренний – трубкой из нержавеющей стали $\varnothing 10 \times 1,0$.

Обогрев канала осуществлялся прямым электроконтактным способом от сварочного трансформатора типа ТДФ-1001УФ, позволяющего регулировать величину рабочего тока через канал от 0 до 1500 А. Для предотвращения перетекания тока через контур рабочий канал разделен токоразделительными фланцами с текстолитовым изолятором. Ток на рабочий канал передавался через латунные клеммы, позволяющие менять обогреваемую длину канала и предотвращающие его контактный перегрев в точках подключения силовых кабелей.

При проведении эксперимента измерялись следующие теплогидравлические стационарные параметры:

давление перед каналом – образцовым манометром, диапазон измерения которого составляет 0–16,0 МПа (класс точности – 1,0);

расход – шайбовым узлом, состоящим из диафрагмы и дифференциального датчика давления ЕJA110А-DMS3А фирмы «Yokogawa» (класс точности – 0,2). Для повышения достоверности измерений расход уточнялся по тепловому балансу канала. Данные, отличающиеся более чем на 10 %, выбраковывались;

температура на входе и выходе из канала измерялась термопарами градуировки ТХК. Вторичным прибором для термопары является потенциометр КСП-4 (класс точности – 1,0), диапазон измерения которого составляет 0–400 °С.

При выходе канала на неустойчивый режим в нем возникают установившиеся термоакустические колебания давления и расхода частотой 50–500 Гц. Пульсации давления в экспериментальном канале измерялись с помощью малоинерционного датчика давления ДДИ-20, собственная частота которого ~ 100 кГц, совместно со специализированным

вторичным прибором ИВП-2. Система датчик – индикатор давления имеет рабочую полосу частот 0–1200 Гц при неравномерности амплитудно-частотной характеристики не более $\pm 5\%$. Подключение датчика к каналу выполнялось через переходной штуцер, имеющий следующие размеры: $r = 4$ мм, $l = 10$ мм – соответственно радиус и длина соединительной трубки; $V = 1$ см³ – объем предвключенной полости. При таких размерах переходного штуцера его резонансная частота будет равна

$$f_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{3\pi r^2 c^2}{4V}} \approx 2 \text{ МГц},$$

где c – скорость звука в среде, заполняющей переходной штуцер.

Показывающим прибором был осциллограф С1-69 с верхней рабочей частотой 10 МГц, регистрирующим – шлейфовый осциллограф К-121, позволяющий записывать сигналы с датчиков по восьми каналам на фотобумагу УФ-67.

Мощность, подводимая к каналу, определялась по значениям тока и напряжения, подаваемым на канал. Величина тока измерялась амперметром Д5090 (предел измерений – 0...5 А, класс точности – 0,2) и измерительным трансформатором тока УТТ6 (класс точности – 0,2), напряжение – комбинированным вольтметром К505 (пределы измерений – 0...75 В, класс точности – 0,5).

В результате эксперимента (более 60 серий) в области давлений 0,1–1,3 МПа получено около 500 экспериментальных точек. Их последующая обработка проводилась в области критериев:

$$K_1 = \frac{q}{\rho\omega r} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{T_{\text{вх}}}{T_s(P_{\text{вх}})},$$

где q – удельная мощность, подводимая к каналу, Вт/м²; r – теплота парообразования, Дж/кг; $\rho\omega$ – удельный расход теплоносителя, кг/с·м²; индексы вх и s в обозначении температуры T (°С) соответствуют входным параметрам и состоянию насыщения.

Критерий K_1 представляет отношение удельной мощности, подводимой к каналу к мощности, расходуемой на испарение протекающей по каналу жидкости при данном давлении, критерий K_2 – оценку степени недогрева воды на входе в канал по отношению к температуре насыщения при данном давлении.

Обработка в указанных критериях экспериментальных данных наиболее представительных выборок по давлению (1, 8, 9, 11 ата) для трубки $\varnothing 10 \times 1,0$ показала существенное расслоение опытных данных по давлению, которое не отмечалось в исследованиях других авторов [1–7, 10, 11, 13].

Для учета влияния давления был проведен расчет корреляции критериев K_1 и p_k/p_s , показавший, что влияние давления в области исследованных параметров может быть учтено поправкой $K_3 = \left(\frac{p_k}{p_s}\right)^{0,5049}$, где

p_k – критическое давление; p_s – давление насыщения.

Для построения границ области ТАК были проведены статистические расчеты по выборкам экспериментальных данных. В частности, максимальное отношение стандартного отклонения и медианы, равное 0,2571, получено для выборки данных по давлению 0,1 МПа, а минимальное значение (0,0387) — для 1,0 МПа. Доверительная вероятность имела минимальное значение (0,7) для выборок данных по давлениям 0,1 и 0,8 МПа и максимальное значение 1,0 для давлений 0,9; 1,1; 1,2 и 1,3 МПа, при этом средневзвешенная доверительная вероятность по всей исследуемой области составила значение 0,8739.

Границы области ТАК выбраны линейными и с учетом доверительной вероятности, равной 0,8739, представлены на рис. 2.

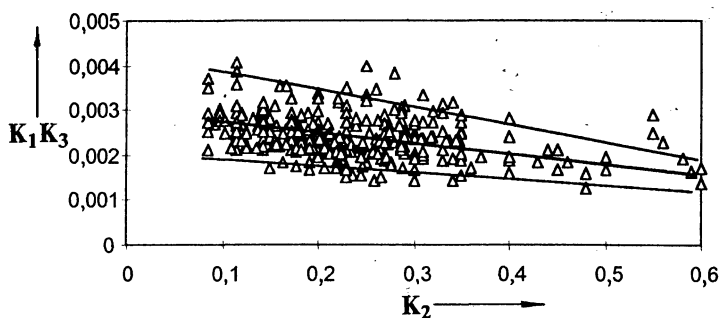


Рис. 2. Область режимных параметров ТАК в рамках принятых критериев с установленными доверительными интервалами и линейной аппроксимацией

Для верификации эксперимента было просмотрено 14 работ по экспериментальному исследованию ТАК [1–14]. Практически во всех работах отсутствовало подробное описание методики проведения эксперимента, что не позволило обработать представленные в них данные в рамках указанных выше критериев K_1 – K_2 совместно с нашими данными. Исключением являлись работы В. А. Герлиги и Н. И. Антонюк (взято из [13]) и А. М. Кичигина и Л. А. Кесовой [2].

Результаты работы [2], несмотря на удобное табличное представление, не содержат сведений о длине обогреваемого канала. Однако в ней имеются данные, по которым можно судить о масштабном эффекте (канал коаксиальный с обогревателем диаметром 6 и 14 мм, установленным внутри стеклянной трубки (зазоры 0,6; 0,8; 1,2; 3,0 мм)), поэтому целесообразно представить эти данные в области критериев K_1 – K_2 , чтобы оценить качественное расположение точек. Так как длина участка не была указана в статье, при составлении критерия K_1 ее приняли равной 1,0 м (ориентировочно рассчитали по тепловому балансу).

На рис. 3 дается совместное представление опытных данных Герлига–Антонюк [13] и Кичигин–Кесова [2] и сравнение их с нашими характеристиками. По рис. 3 виден значительный разброс точек, полученных Кичигиным и Кесовой.

Из рисунка видим, что наклон тренда наших данных совпадает с данными [13]. Имеющиеся отличия в «кучности» расположения экспериментальных данных связаны с тем, что в [13] представлены исключительно граничные точки, тогда как у нас показаны точки как на границе, так и внутри области ТАК. Вызывает сомнение то, что в наших данных расслоение по давлениям шло в сторону повышения значений критерия K_1 и понижения K_2 при росте давления, в то время как распо-

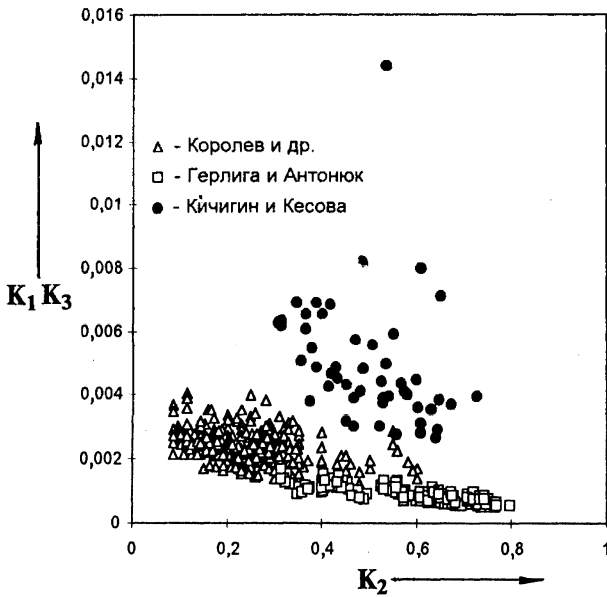


Рис. 3. Сравнение данных по ТАК, полученных разными авторами

ложение опытных точек в [13], полученных при значительно больших давлениях (10–13 МПа), наоборот, смещается в область меньших значений K_1 и больших значений K_2 (рис. 4). А данные Кичигина и Кесовой вообще не имеют сколько-нибудь значимого тренда.

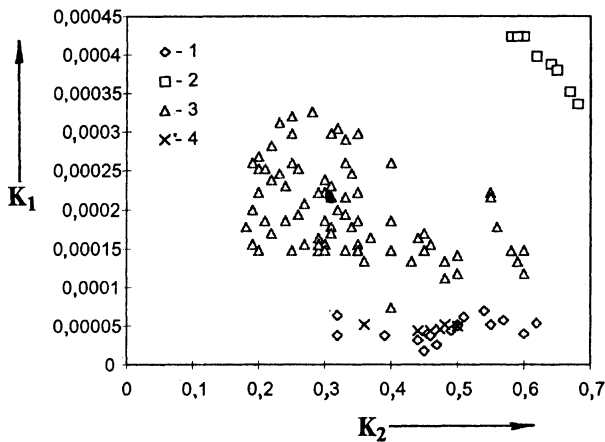


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных, полученных на каналах разного диаметра: 1 - $\varnothing 3,3 \times 0,25$; 2 - $\varnothing 20 \times 1,5 + 10 \times 1,0$; 3 - $\varnothing 10 \times 1,0$; 4 - $\varnothing 6 \times 1,0$

Для решения вопроса о влиянии масштабного фактора на стенде (рис. 1) была проведена серия экспериментов при одном значении давления (0,1 МПа) на каналах различной конструкции. В эксперименте участвовали каналы, выполненные из трубок диаметрами $\varnothing 3,3 \times 0,25$; $6 \times 1,0$; $10 \times 1,0$ и коаксиальной конструкции — кварцевая трубка $\varnothing 20 \times 1,5$, в которой размещена нержавеющая трубка $\varnothing 10 \times 1,0$.

Обработка полученных данных представлена на рис. 4.

Рис. 4 показывает, что имеется расслоение опытных данных на группы, соответствующие различным диаметрам. Так как большая часть точек, особенно точки 2 и 4, получены при прохождении зоны ТАК на постоянном расходе, тепловом потоке и изменяющейся температуре теплоносителя, просматривается интересная тенденция — области клином сходятся к одному фиксированному значению K_2 , близкому к 1. Другими словами, должно наблюдаться соотношение $K_1/K_2 = K_4 = f(L/d)$.

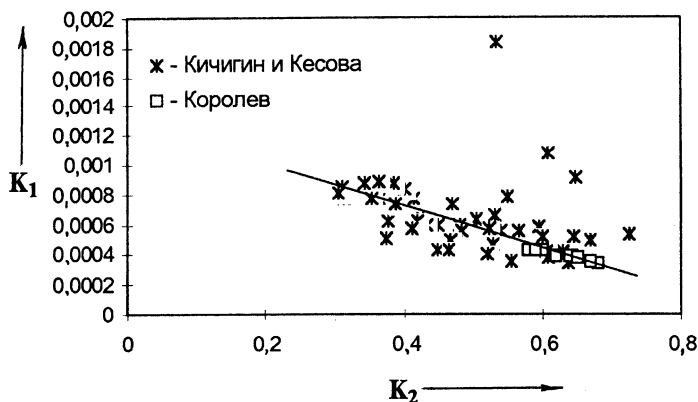


Рис. 5. Сравнение данных по ТАК, полученных на коаксиальных каналах

Сопоставление наших данных с данными [2] (рис. 5) показывает практически полное их совпадение. Кроме этого, из рис. 5 видим, что линия, аппроксимирующая эти данные, стремится к пересечению оси K_2 в точке со значением 1,0, подтверждая ранее принятые предположения о соотношении между K_1/K_2 и масштабным фактором.

Обработка опытных данных с учетом масштабного фактора L/d показала, что без влияния давления тренд экспериментальных данных может быть аппроксимирован следующим соотношением:

$$K_1 = 0,483K_2 \left(\frac{L}{d}\right)^{-1,682} = C_1K_2K_4. \quad (1)$$

Учитывая ранее полученные данные о влиянии давления на ТАК (рис. 3), окончательно критериальный комплекс, описывающий область существования ТАК, будет выглядеть следующим образом:

$$K_1 = C_2K_2 \left(\frac{p_k}{p_s}\right)^{0,505} \left(\frac{L}{d}\right)^{-1,682} = C_2K_2K_3K_4. \quad (2)$$

ВЫВОДЫ

1. Получен критериальный комплекс для описания области существования термоакустических колебаний, учитывающий режимные и масштабные факторы.

2. Показано влияние давления и степени недогрева воды на входе в канал на сходимости области термоакустических колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Возникновение высокочастотных колебаний давления при теплообмене с диизопропилциклогексаном // ИФЖ. – 1966. – Т. 11, № 1. – С. 99–104.
2. Кичигин А. М., Кесова Л. А. О возникновении звуковых колебаний при переходе от поверхностного кипения к пленочному // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений), – 1966. – № 8. – С. 114–117.
3. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. О разрушении труб ВЧ-колебаниями давления, возникающими при теплообмене // Атомная энергия. – 1967. – Т. 23. Вып. 2. – С. 147–149.
4. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Высокочастотные колебания давления, возникающие при теплоотдаче к этиловому спирту // Теплофиз. высок. температур. – 1967. – Т. 5, № 4. – С. 720–723.
5. Кичигин А. М., Кесова Л. А. Взаимосвязь между характером звуковых колебаний и видом поверхностного кипения воды в кольцевых каналах // Журн. прикл. мех. и техн. физ. – 1967. – № 6. – С. 79–82.
6. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Исследование высокочастотных колебаний давления, возникающих при теплоотдаче к воде // Теплоэнергетика. – 1968. – № 1. – С. 47–49.
7. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Об условиях возникновения псевдокипения при теплообмене с турбулентным потоком жидкости // ИФЖ. – 1968. – Т. 14, № 5. – С. 923–924.
8. Каплан Ш. Г., Толчинская Р. Е. Возникновение высокочастотных колебаний давления в процессе теплообмена при вынужденном движении жидкости // ИФЖ. – 1969. – Т. 17, № 3. – С. 486–490.
9. Корнелиус А., Паркер Д. ж. Неустойчивость теплообмена вблизи термодинамической критической точки // Достижения в области теплообмена. – М.: Мир, 1970. – 455 с.
10. Герлига В. А., Прохоров Ю. Ф., Шмаков А. А. О звуковых колебаниях в обогреваемых каналах // Теплофиз. высок. температур. – 1971. – Т. 9, № 5. – С. 1084–1086.
11. Ветров В. И., Герлига В. А., Разумовский В. Г. Экспериментальное исследование термоакустических колебаний в обогреваемых каналах при сверхкритических давлениях воды // Вопросы атомн. науки и техн. Сер. Динамика ядерных энергетических установок. – 1977. – Вып. 2 (12). – С. 51–57.
12. О механизме термоакустических колебаний / В. Д. Васьянов, Н. Л. Кафенгауз, А. Г. Лебедева и др. // ИФЖ. – 1978. – Т. 34. – № 5. – С. 773–775.
13. Герлига В. А., Скалозубов В. И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат. – 1992. – 432 с.
14. Бошкова И. Л. Моделирование термоакустических явлений в парогенерирующих каналах с учетом потерь механической энергии: Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: Одесск. гос. акад. холода, 1995. – 107 с.
15. Bouge J. A., Bergles A. E., Tong L. S. Review of two-phase flow instability // Nucl. eng. and design. – 1973. – V. 25. – P. 165–192.

Представлена кафедрой АЭС

Поступила 30.12.1999

УДК 621.1.0.18

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Канд. техн. наук, доц. ПАПКОВИЧ В. Н.,
инженеры КАСНЕРИК Е. Н., ЛЕВОШЕНЯ Е. П.

Белорусская государственная политехническая академия

1 Математические модели, описывающие тепловые процессы нагрева заготовок в печах, отличаются высокой вычислительной сложностью; кроме того, решение дифференциальных уравнений с частными производными в аналитическом виде невозможно. Применение численных методов также негативно сказывается на времени расчета. В связи с этим представляется целесообразным аппроксимировать уравнение ис-