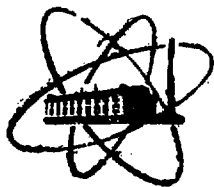


SU 78 09455

ФЭИ-773



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Р. Ф. МАСАГУТОВ, В. А. КРИВЦОВ

Исследование шумов кипения воды ЕМ
в большом объеме

**Часть I. Влияние удельного теплового потока
и величины недогрева жидкости на спектр шума
локального кипения воды**

Обнинск — 1977

ВНИИ-773

АККУМУЛЯТОРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Р.Ф.Масагутов, В.А.Кривцов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУМОВ КИПЕНИЯ ВОДЫ
В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

Часть I. Влияние удельного теплового потока и
величины подогрева жидкости на спектры
пум локального кипения воды

Обнинск - 1977

УДК 534.8; 536.24

И-17

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты измерения спектров шумов кипения воды в большом объеме при давлении 1 атм. Кипение дистиллированной воды осуществлялось на нагревателях из стали Х18Н10Т длиной 50 мм, наружным диаметром 2 мм и толщиной стенки 0,1 мм. В экспериментах изменялась степень подогрева воды в объеме от 0 до 80 °С и величина удельного теплового потока от 0 до 0,7-0,9 q^* , равного удельному тепловому потоку пережога трубки. Анализ спектров шумов кипения воды проведен в диапазоне частот от 0,5 до 200 кГц. В измерениях использовались пьезоэлектрические датчики погружного типа.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем в обеспечении безопасной работы АЭС с реакторами, охлаждаемыми теплоносителями с повышенными параметрами, является своевременное обнаружение аварийной ситуации, связанной с закипанием теплоносителя в каналах активной зоны. Рядом работ была показана перспективность использования акустических средств измерений при создании системы контроля кипения в активной зоне [1,2,3]. Это обусловлено тем, что между особенностями протекания процесса кипения и характером шума, сопровождающего кипение, существует взаимосвязь [4]. Вместе с тем большинство работ, выполненных к настоящему времени, посвящено исследованию шумов в условиях кипения воды при нулевом недогреве или при малых его величинах. Анализ спектров шумов ограничивался лишь слышимым диапазоном частот. Изучение спектров шумов кипения в условиях вынужденной конвекции воды проводилось в широком диапазоне частот, включая и ультразвуковую область [6]. Однако это исследование не дало физических представлений о механизме шумообразования при кипении, что, по всей видимости, имеет первостепенное значение при разработке системы контроля.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния недогрева и плотности теплового потока на спектры шумов кипения воды в большом объеме для выяснения возможностей обнаружения кипения в ультразвуковом диапазоне частот.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

1.1. Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 1. Кипение воды осуществлялось в баке из стали Х18Н10Т емкостью ~ 600 литров. Высота бака составляла 900 мм, диаметр - 850 мм. Акустический датчик, описание которого приведено в [7], и кипятильное устройство монтировались на съемной крышке бака. На стенках бака были расположены два окна, одно из которых использовалось для освещения содержимого бака, а другое - для визуальных наблюдений за процессом кипения. Кипятильное устройство располагалось в центре бака. Нагревательным элементом этого устройства служила трубка из стали Х18Н10Т длиной 50 мм, диаметром 2 мм и толщиной стенки 0,1 мм,

через которую пропускался постоянный ток напряжением до 6 вольт. Подогрев воды в баке с целью изменения температуры жидкости в объеме бака осуществлялся тремя нагревателями, расположенными на внешней поверхности бака. Мощность каждого нагревателя составляла 5 квт.

В экспериментах исследовалось влияние величины удельного теплового потока и недогрева жидкости на характеристики шума кипения. Недогрев воды (дистиллата) изменялся от 0 до 80 °С, а тепловой поток от 0 до 0,8 q^* , где q^* - величина удельного теплового потока, при котором наступал переког трубки.

1.2. Измерительная аппаратура

Блок-схема акустических измерений представлена на рис. 1. Сигнал от акустического датчика усиливался широкополосными предварительным и окончательным усилителями и подавался на приборы оценки, анализа и записи сигналов. Характеристики усилителей описаны в работе [1]. Для оценки анализируемого сигнала использовался осциллограф. Анализ спектров шумов проводился с помощью анализаторов спектра С4-44 (в диапазоне частот 0,3-20 кгц с шириной полосы анализа 0,2 кгц) и С5-2 (в диапазоне частот 15-200 кгц с шириной полосы анализа 3 кгц) гетеродинного типа. Предварительно запись сигналов производилась на магнитную ленту. Анализ пробных измерений шумов в различных полосах частот показал, что шум имеет квазистационарный характер (независимость среднеквадратичного уровня шума от времени). Поэтому в дальнейшем магнитограф, в основном, не использовался. Выходные сигналы анализаторов записывались на самописец уровня. Измерительная аппаратура обеспечивала анализ спектров шумов в диапазоне частот 0,3-200 кгц. Тепловой режим в баке контролировался с помощью термомпар, установленных на поверхности бака и в объеме воды.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Визуальное наблюдение за процессом развития кипения показало, что при насыщенном кипении воды образуются крупные пузырьки, которые поднимаются от нагревателя вверх и складываются лишь на свободной поверхности. Интенсивность шума при насыщенном кипении мала. Результаты измерения спектров шумов насыщенного кипения во-

ды в зависимости от величины удельного теплового потока на нагревательной трубке приведены на рис. 3. Видно, что шум кипения регистрируется лишь в диапазоне частот до 7-8 кгц. С увеличением теплового потока частотный диапазон распространения шумов кипения вначале расширяется от 4-5 кгц до 7-8 кгц, а затем сужается до 2-3 кгц. Характерным для этих спектров является отсутствие выраженных экстремумов. Последнее согласуется с представлением о том, что в условиях насыщенного кипения жидкостей стоячих волн не образуется. Относительно низкие частоты, генерируемые при насыщенном кипении шумов, объясняются относительно большими размерами паровых пузырей, которые схлопываются лишь на поверхности воды. Схлопыванием паровых пузырей на поверхности воды можно объяснить и низкую интенсивность шума. Как известно [5], максимальные импульсы звукового давления генерируются при схлопывании паровых пузырей в объеме жидкости, а это имеет место лишь при кипении с недогревом. На рис. 2 представлена зависимость уровня шума, замеренного на частоте 3,0 кгц при ширине полосы 0,2 кгц, от величины удельного теплового потока. Видно, что с возникновением кипения в рассматриваемом случае уровень шума увеличивается незначительно.

На рис. 4 представлены результаты измерения шумов кипения воды при недогреве 3 °С (температура воды в объеме - 97 °С). При зарождении кипения (верхняя кривая) спектр шума подобен спектрам шумов насыщенного кипения как по структуре спектра и уровню шума, так и по его частотному диапазону распространения. Шумы регистрируются лишь в диапазоне частот до 6-7 кгц, в спектре шума отсутствуют выраженные максимумы и минимумы. По мере увеличения теплового потока в баке формируются стоячие волны, о чем свидетельствует нарастающий максимум на частоте 3,0 кгц. С дальнейшим увеличением теплового потока появляется гармоника этого максимума на частоте 9,0 кгц, а также максимумы на частотах 3,5 кгц и 18,7 кгц. Вместе с тем, основная доля энергии, илучаемой при кипении с недогревом 3 °С, сосредоточена в диапазоне частот до 10 кгц. Это соответствует данным визуальных наблюдений, согласно которым при недогреве 3 °С имеют место менее крупные пузыри, чем при насыщенном кипении, но еще достаточно большие. Часть пузырей успевает схлопываться в объеме жидкости, другая часть - на свободной поверхности. Поэтому уровень шума здесь выше, чем в случае насыщенного кипения. Как при насыщенном кипении, так и в условиях кипения с

недогревом 3°C в ультразвуковом диапазоне частот шум не регистрировался.

При кипении с недогревом 10°C (рис. 5) стоячая волна в баке начинает формироваться с самого начала момента зарождения кипения. На самой верхней кривой отчетливо виден максимум на частоте $2,4$ кгц. Частотный диапазон распространения шумов кипения расширяется с увеличением теплового потока более быстро, чем при недогреве 3°C . Нарастает и число максимумов в спектре шума, а также высота этих максимумов. По всей вероятности, с увеличением степени недогрева воды условия формирования стоячих волн улучшатся. С увеличением степени недогрева возрастает и интенсивность шума. Ультразвуковых составляющих (с частотой выше 20 кгц) в спектре шума при кипении с недогревом 10°C также не обнаружено.

Дальнейшее увеличение степени недогрева (рис. 7) приводит к увеличению уровня шума во всем диапазоне частот, повышению амплитуды максимумов и сплошному заполнению ими спектра шума - весь спектр приобретает острорезонансный характер. Обращают на себя внимание два обстоятельства: при минимальных тепловых потоках зарождение кипения приводит к генерации шума в отдельных полосах частот; затем заполняется весь спектр (верхняя кривая на рис. 7). При тепловых потоках, близких к условиям пережога, часть максимумов в спектре шума пропадает.

Увеличение степени недогрева от 13°C до 80°C показало, что интенсивность шумов кипения непрерывно нарастает до недогревов $30+35^{\circ}\text{C}$, достигает насыщения и практически не меняется до недогревов $\sim 80^{\circ}\text{C}$. На рис. 6 представлены спектры шумов кипения при недогреве 80°C . По структуре шумов и частотному диапазону их распространения они мало чем отличаются от спектров шумов кипения, полученных при недогревах 33°C , 46°C , 64°C и т.д.

Начиная с недогревов $15-20^{\circ}\text{C}$, регистрируются шумы в ультразвуковом диапазоне частот (свыше 20 кгц). Спектры шумов кипения в диапазоне частот $15-200$ кгц для различных величин недогревов при плотностях теплового потока, близких к условиям пережога, показаны на рис. 8а. Аналогичные спектры для меньших значений удельного теплового потока приведены на рис. 8б. Видно, что верхняя частотная граница распространения шумов кипения зависит как от величины недогрева, так и от плотности теплового потока, причем для обеих зависимостей характерно достижение насыщения при определенных значениях этих величин.

Максимальная верхняя частотная граница распространения шумов кипения в экспериментах составила 90-100 кгц. Анализируя полученные данные, можно предположить, что частотный диапазон распространения шумов кипения должен существенно зависеть от величины давления в системе, а в условиях вынужденной циркуляции и от скорости движения теплоносителя, так как определяющую роль в формировании шумов кипения играют размеры пузырей, скорости их роста и деградации (схлопывания).

Следует также отметить, что термин "большой объем" употребляется в тексте лишь в чисто теплофизическом смысле, т.е. характеризует условия теплообмена, а не условия распространения акустических шумов кипения.

ВЫВОДЫ

I. В условиях кипения воды в большом объеме генерируются акустические шумы, характеристики которых - интенсивность и частотно-энергетический спектр - существенно зависят от теплового потока и степени недогрева воды до температуры насыщения. С увеличением величины недогрева до 80 °C и плотности теплового потока до пережога трубки частотный диапазон распространения шумов кипения и их интенсивность возрастают до достижения насыщения.

✗ При кипении с недогревом в условиях проведенного эксперимента формировались стоячие волны, которые определяли структуру измеренных спектров. При насыщенном кипении воды наличие стоячих волн не было обнаружено.

✗ Процесс кипения воды при недогревах выше 15-20 °C сопровождается шумами в ультразвуковом диапазоне частот. Максимальная верхняя граница распространения шумов в опытах составила 90-100 кгц.

Авторы выражают признательность тов. Козлову Ф.А., Дгаю В.С. за обсуждение результатов исследований; Луковцу В.Н. и Белтову А.П. за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- I. Масягутов Р.Ф., Кривцов В.А., Дгай В.С. Исследование шумов кипения сплава натрий-калий в кольцевом канале. Препринт ФЭИ-708, Обнинск, 1976.

2. Cross M. et al. Experimental results on acoustic detection of medium and water boiling, *Atomenergie*, 17, N°4, 1971, p.255.
3. Saxe R.F. The detection of boiling in nuclear reactors, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-18, February, N°1, p.337, 1970.
4. Неске Е.И., Дорофеев Б.М. Акустический метод исследования кипения (обзор). В сб. "Исследования по физике кипения", Ставрополь, СТПИ, вып. I, стр. 3, 1972.
5. Osborne M.F.M. The Shock produced by a collapsing cavity in water. *Trans. Amer. Soc. Mech. Eng.* 69, N°3, 259-266 (Apr.1947).
6. Dunn M.I., Ohanian M.I. Boiling detection in the 20-50kHz frequency range, *Nuclear power plant control and instrumentation 1973, Proceedings of a symposium held by IAEA in Prague, 22-26 January 1973, Vienna, 1973.*
7. Масагутов Р.Ф., Кривцов В.А. Описание конструкций, вопросы изготовления и результаты испытаний пьезоэлектрических датчиков на основе нитрата лития. Препринт ФЭИ-563. Обнинск, 1975.

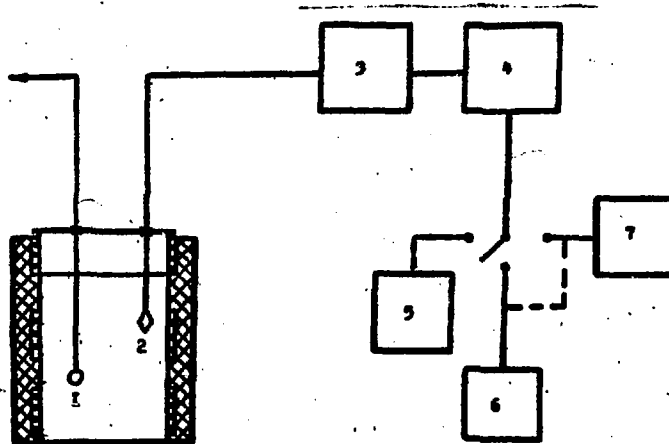


Рис. 1. Схема акустических измерений.
1 - нагреватель; 2 - акустический датчик; 3 - предусилитель;
4 - оконечный усилитель; 5 - осциллограф; 6 - анализатор спектра; 7 - магнитофон.

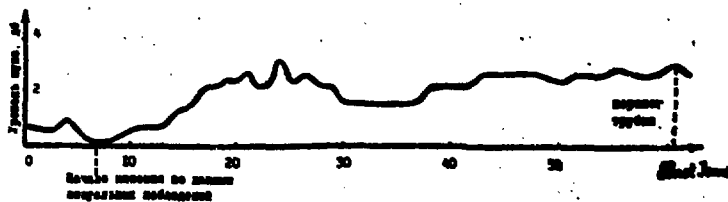


Рис. 2. Зависимость уровня шума от тока на нагревателе при насыщенном кипении.

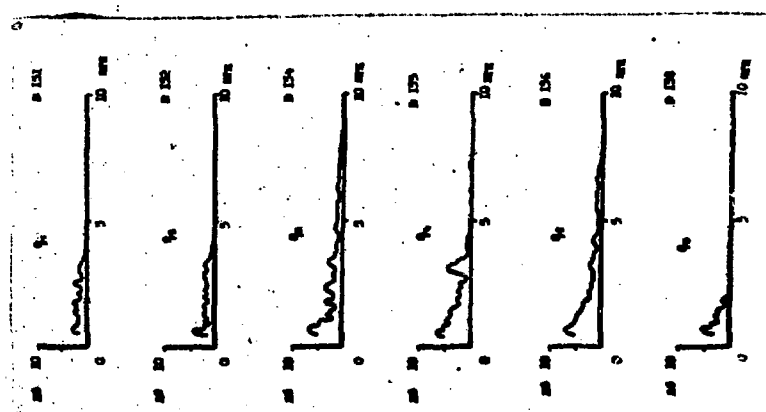


Рис. 3. Частотно-энергетические спектры шумов насыщенного кипения воды.

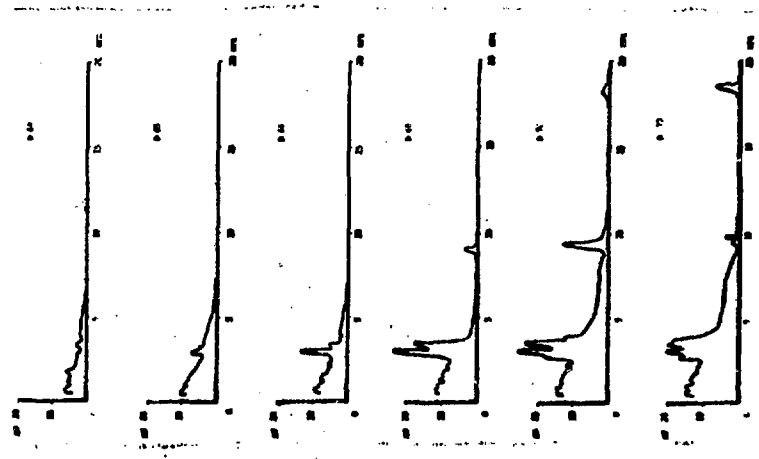


Рис. 4. Частотно-энергетические спектры шумов кипения воды при недогреве 3°C ($T_{\text{воды}} = 97^{\circ}\text{C}$).

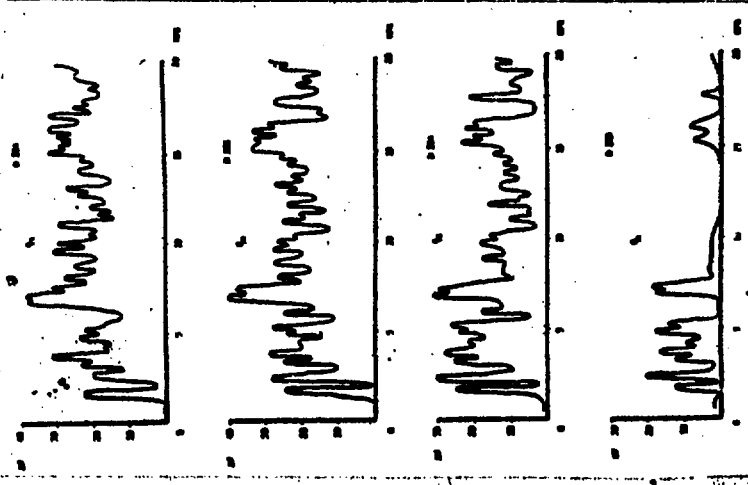


Рис. 7. Частотно-энергетические спектры
 шумов кипящей воды при нагреве
 80°C (T_{воды} = 20°C).

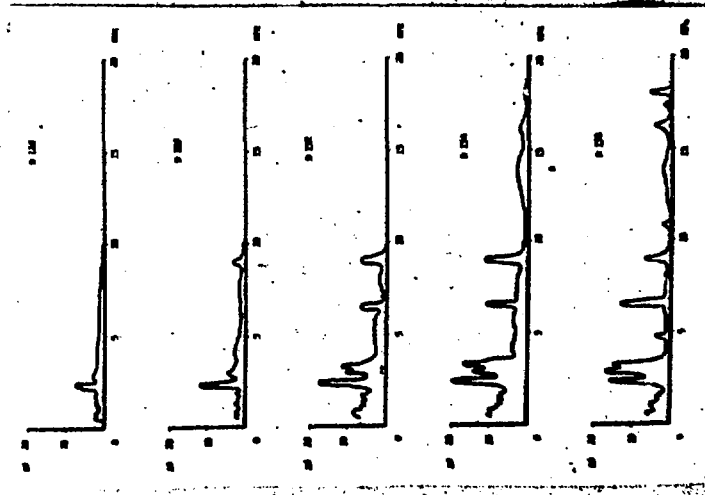


Рис. 5. Частотно-энергетические спектры
 шумов кипящей воды при нагреве
 10°C (T_{воды} = 90°C).

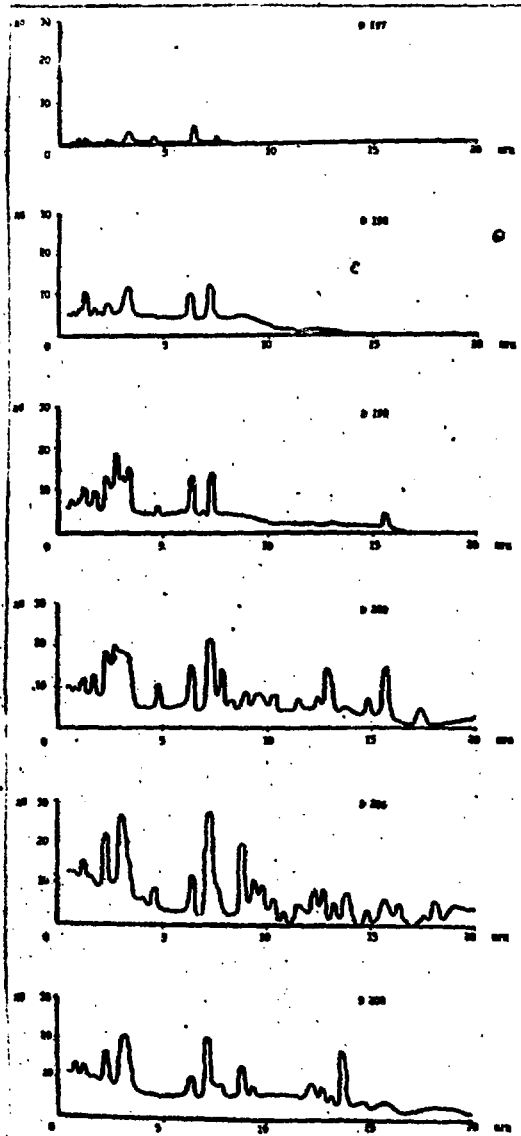


Рис. 6. Частотно-энергетические спектры шумов
кислотной воды при медленном нагреве 13°C
($T_{\text{воды}} = 87^{\circ}\text{C}$).

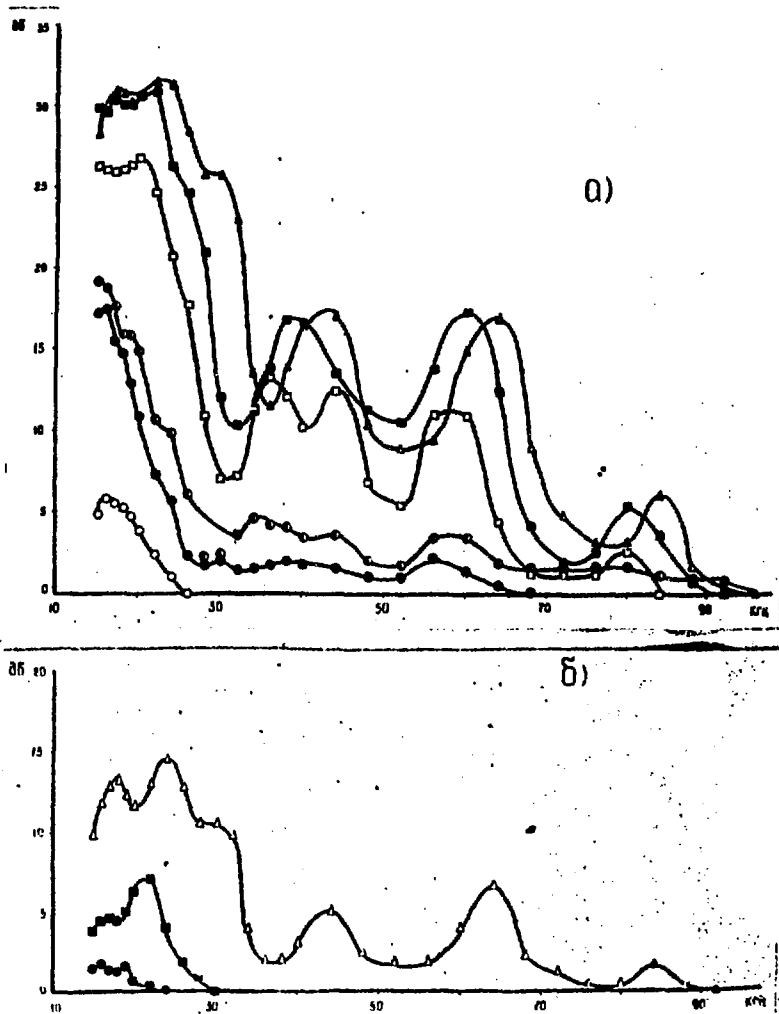


Рис. 8. Спектры шумов кипения воды в ультразвуковом диапазоне частот (15 - 200) кГц.

а) при тепловом потоке, близком к условиям перегрева;

б) при тепловом потоке, равном I, I_0 кач.кнн.

○ - $\Delta T_{\text{над.}} = 15^\circ\text{C}$; ● - $\Delta T_{\text{над.}} = 20^\circ\text{C}$; □ - $\Delta T_{\text{над.}} = 25^\circ\text{C}$;

■ - $\Delta T_{\text{над.}} = 31^\circ\text{C}$; △ - $\Delta T_{\text{над.}} = 80^\circ\text{C}$; ○ - $\Delta T_{\text{над.}} = 25^\circ\text{C}$.

773. Т-12578 от 5.08.77 г. Объем 0,6 уч.-над.л. Тираж III экз.

Индекс 3624. Цена 6 коп. Заказ № 533

Отпечатано на ротационной машинке 93М. Сентябрь 1977 г.

Цена 6 коп.

Индекс 3624