

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хеншелл Б. Некоторые аспекты использования ударных труб в аэродинамических исследованиях. Сб. «Ударные трубы», Изд. иностр. лит., М., 1962.
2. Саламандра Г. Д. и др. Некоторые методы исследования быстропотекающих процессов и их применение к изучению формирования детонационной волны. Изд-во АН СССР, М., 1960.
3. Сахаров А. А. Высокоскоростная киносъемка. Госкиноиздат, М., 1950.
4. Дунаев Ю. А., Мишин Г. И. Баллистическая труба для измерения коэффициентов сопротивления тел в свободном полете. Изв. АН СССР, ОТН, механика и машиностроение, 1959, № 2.
5. Дубовик А. С., Сицинская Н. М. О применении высокоскоростных фотокамер совместно с теньвыми установками. Приборы техн. эксперимента, 1962, № 5.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ЗВУКОВЫХ ВОЛН В НАСЫЩЕННОМ ПАРЕ ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ  
ДАВЛЕНИЯХ**

*В. И. Авдонин, И. И. Новиков, Е. П. Шелудяков*

*(Новосибирск)*

В работе [1] были приведены результаты измерений скорости звука в насыщенных парах воды в интервале температур 50—250°С. В последнее время удалось довести измерения до температуры 350°С. Для этих целей была реконструирована экспериментальная установка, описанная в [1, 2], разработана новая экспериментальная установка, также основывающаяся на методе стоячих волн.

В реконструированной установке использовался новый акустический резонатор, изготовленный вместе с гребнем из нержавеющей стали длиной 803,75, внутренним диаметром 65 и толщиной стенки 10 мм. В гребне и прилегающей к нему стенке трубы резонатора были просверлены отверстия диаметром 1,5 мм с шагом 10 мм для заполнения резонатора насыщенным паром.

Новый автоклав, рассчитанный на работу с высокими температурами и большими давлениями, изготовлен в виде цилиндра из нержавеющей стали IX18H9T длиной 124,0, внутренним диаметром 12,0 и толщиной стенки 1,5 см.

Баллон автоклава на одном конце имеет отверстие, закрываемое крышкой с фланцевыми соединениями, а на втором конце герметически заварен. Оба фланца баллона съемочные. Первый фланец крепится к баллону на резьбе, а второй фланец служит крышкой и крепится к первому двенадцатью болтами диаметром 20 мм из стали повышенной прочности.

Поддержание постоянной температуры в термостате обеспечивалось двумя нагревательными элементами — основным и вспомогательным (до реконструкции имелся один нагреватель). Основной нагреватель питается стабилизированным напряжением, мощность которого варьируется от 0 до 6 кВт в зависимости от поддержания заданного температурного уровня в термостате.

Второй автоматически регулирующийся нагреватель устанавливается на мощность от 0 до 0,5 кВт. Регулируемая мощность второго нагревателя составляет не более 10% от мощности основного нагревателя. Это позволяет использовать для регулирования термостата малоинерционное реле. Датчиком регулирования температуры термостатирующей жидкости служит ртутный контактный термометр, расположенный вблизи второго нагревательного элемента. В зависимости от величины температурного уровня использовался один из набора контактных термометров с различными пределами регулирования.

Термостатирующая жидкость в термостате интенсивно перемешивалась четырьмя мешалками пропеллерного типа, приводимыми во вращение четырьмя электромоторами, расположенными на крышке термостата.

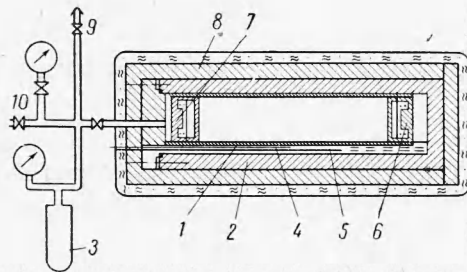
Простая и надежная система регулирования термостата позволяла поддерживать температуру в нем с точностью до 0,02°С. Надежность регулирования термостата подтверждается и тем, что 4 медно-константановые термопары, расположенные в автоклаве для измерения градиента температуры в нем по длине и по радиусу, не дали разности в показаниях температуры с точностью до 0,02°С.

Измерение температуры в автоклаве производилось 100-омным платиновым термометром сопротивления и четырьмя медно-константановыми термопарами на потенциометрах ПМС-48 и ППТН-1 с точностью до 0,02°С.

При измерениях ниже комнатной температуры использовался водно-ледяной термостат. От комнатной температуры до 120°С термостатирующей жидкостью служило минеральное масло с малой вязкостью, а от 120°С и выше — масло «Валор Т».

Измерения скорости звука в насыщенном водяном паре при давлениях выше 1.5 *ата* включали и измерения давления в автоклаве грузопоршневым манометром МП-60 или МП-600 класса точности 0.05 — в зависимости от величины давления. Полученные значения давления с точностью использованных для измерения давления приборов совпали с табличными данными [3] на кривой насыщения, соответствующими измеренным температурам.

Разделительным устройством между автоклавом и грузопоршневым манометром при измерении давления в автоклаве



Фиг. 1

состоял из дифференциального манометра ДМ-6. Для измерения разности давления, не скомпенсированного грузопоршневым манометром, применялся электронный дифференциально-трансформаторный прибор ЭПИД-09 класса точности 2, с пределами измерения 45—180 мм рт. ст.

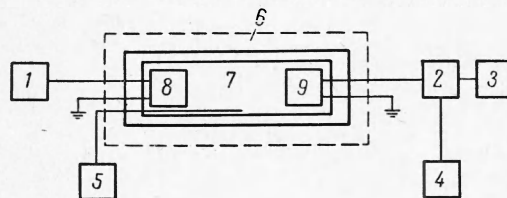
Значительно усовершенствовано измерение частоты генератора пересчетным устройством при установившейся стоячей волне в резонаторе. Измерения проводились на новом более стабильном звуковом генераторе ЛИУ-150.

Трудности, имевшие место при прежних измерениях и вызывавшиеся главным образом нарушением электрического контакта в катушках динамика и микрофона после реконструкции, были в значительной степени устранены. Использование литой проволоки большого сечения в стеклянной изоляции позволило в несколько раз увеличить срок работы динамика и микрофона. Особенно увеличил время работы датчиков при высоких температурах и больших давлениях новый вид их с неподвижными катушками, использованный в настоящей работе.

Новая экспериментальная установка схематически изображена на фиг. 1.

Резонатором служила труба 1 из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т с внутренним диаметром 34, длиной 566 и толщиной стенки 2.5 мм. Резонатор помещался в горизонтально расположенный автоклав 2 внутренним диаметром 50 и длиной 650 мм. В автоклав заливалось 0.5—1.2 л дистиллированной воды. По мере нагревания автоклава уровень воды понижался. Для повышения уровня вода добавлялась до сосуда 3. Перед заполнением автоклава тщательно откачивался и проверялся на герметичность. После заполнения автоклав прогревался до 80—90° С, и при этой температуре для обезгаживания воды производилось откачивание парового объема автоклава. Чистота пара контролировалась по совпадению давления насыщения с табличным. Давление измерялось в разных диапазонах образцовыми манометрами на 25, 160 и 250 кг/см<sup>2</sup> класса точности 0.35. Температура измерялась платинородий — платиновой термопарой 4 с потенциометром ПМС-48 и гальванометром М17/4. Термопара помещалась в гильзе 5. Звуковые волны в резонаторе создавались телефоном 6. Фиксация стоячей волны в резонаторе осуществлялась при помощи микрофона 7. Провода от телефона и микрофона выводились через специальные электровыводы в крышке автоклава. Телефон и микрофон устроены следующим образом. В корпусе из нержавеющей стали укреплялся электромагнит, состоящий из постоянного магнита с полюсными наконечниками и надетых на них катушек. С небольшим зазором над полюсными наконечниками сердечника располагалась мембрана из пермендюра диаметром 35.5 и толщиной 0.35 мм.

На постоянный магнит, наконечники и мембрану гальваническим путем наносился тонкий слой хрома. Для катушки телефона использовалась нихромовая проволока диаметром 0.8 мм, изолированная лентой из фторопласта-4. Сопротивление катушки составляло 0.6 ом, количество витков — 20. Катушка микрофона наматывалась нихромовой проволокой диаметром 0.15 мм, также изолированная лентой из фторопласта-4. Сопротивление катушки составляло 80 ом, количество витков — 70. Для получения термодинамического равновесия перед измерением температура автоклава выдерживалась в течение 30 мин. с точностью 0.1° С. Автоклав помещался в термостат 8, представляющий собой медный блок с внутренним диаметром 100, наружным 150, длиной 770 мм, ограниченный с торцов медными крышками. Нагревание термостата производилось при помощи трех



Фиг. 2

электрических нагревателей (два — с торцов и один — по длине термостата). Контроль температуры в медном блоке осуществлялся рядом хромель-алюмелевых термопар. Регулирование температуры осуществлялось путем изменения тока в нагревателях при помощи автотрансформаторов. Общая блок-схема установки приведена на фиг. 2, где 1 — звуковой генератор, 2 — усилитель, 3 — осциллограф, 4 — блок питания усилителя, 5 — потенциометр, 6 — автоклав, 7 — интерферометр, 8 — телефон, 9 — микрофон.

Измерения на установке производились следующим образом. Меняя частоту звукового генератора, подающего колебания на телефон, наблюдали 8—9 максимумов на осциллографе. Каждый из этих максимумов соответствовал стоячей звуковой волне в резонаторе; первый максимум отвечал половине длине волны, второй — целой волне и т. д. Скорость звука определялась по формуле

$$c = 2Lf / n$$

где  $c$  — скорость звука в [м/сек],  $L$  — расстояние между телефоном и микрофоном в [м],  $f$  — частота звуковых волн в [гц],  $n$  — число полувольт в резонаторе. Было проведено четыре серии измерений при различных условиях.

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$
0.03	409	30.20	430	77.68	459	141.48	489	204.31	505	263.41	497
0.95	410	32.10	431	82.11	461	145.29	490	209.86	506	267.58	496
3.16	411	35.14	433	87.25	464	148.34	492	215.17	506	272.32	494
4.37	412	37.99	434	93.02	467	153.56	493	220.23	505	276.77	493
5.62	413	43.22	438	98.27	469	157.64	495	221.50	505	281.43	490
8.07	415	46.06	440	101.40	471	162.33	496	226.59	505	285.90	489
10.05	416	48.70	441	105.78	474	166.15	497	229.71	505	289.51	486
12.54	417	52.39	444	110.45	475	171.46	499	234.92	504	292.00	485
14.28	419	56.05	446	114.73	478	174.19	499	240.13	503	293.89	483
17.04	421	59.47	448	118.91	480	179.61	500	240.84	503	297.08	482
19.83	423	63.94	451	123.96	482	185.80	502	246.35	502	300.21	479
20.65	423	68.12	453	126.03	483	189.97	503	250.49	501	302.67	478
23.18	425	71.09	455	131.87	486	194.75	504	256.76	500	306.82	474
26.01	427	74.52	457	137.26	487	200.24	505	260.30	498	310.55	470

В первой серии опытов объем резонатора со стороны телефона и микрофона был ограничен диафрагмами с отверстиями диаметром 4 мм для акустической связи телефона и микрофона. Расстояние измерялось между диафрагмами при 20°С и составляло  $L = 540.0$  мм.

Во второй серии опытов диафрагмы отсутствовали. Расстояние между телефоном и микрофоном было определено по ранее полученным данным по скорости звука в насыщенных парах воды при 200°С и составляло  $L = 559.0$  мм.

В третьей и четвертой сериях опытов диафрагмы также отсутствовали, а расстояние измерялось непосредственно между мембранами при 20°С и оказалось равным  $L = 553.0$  мм.

Результаты измерений всех четырех серий опытов были нанесены на одну кривую. Максимальный разброс точек составил при этом 0.4%.

Результаты измерений скорости звука в насыщенном паре воды в зависимости от температуры приведены в табл. 1 и 2 и графически на фиг. 3, где кривая построена по эмпирической формуле

$$c = \sqrt{1.25gP_s v''}$$

где  $P_s$  — давление насыщенного пара [кг/м<sup>2</sup>],  $v''$  — удельный объем насыщенного пара [м<sup>3</sup>/кг]; светлые точки получены измерениями на новой установке, а темные — на реконструированной установке. Табл. 1 содержит результаты измерения на реконструированной, а табл. 2 — на новой установке.

На фиг. 3 видно, что экспериментальные точки в интервале температур от 150 до 350°С хорошо ложатся на указанную в работе [1] эмпирическую кривую (1).

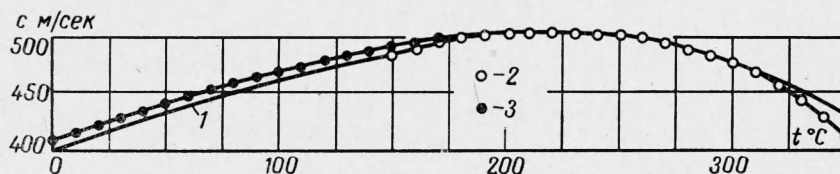
При температурах до 320°С экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретической формулой, полученной И. И. Новиковым [4], для скорости распростра-

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$	$t, ^\circ\text{C}$	$c$
150	487	220	507	290	487
160	491	230	506	300	481
170	495	240	505	310	472
180	500	250	503	320	461
190	503	260	501	330	448
200	505	270	497	340	433
210	506	280	493	350	415

нения звука в двухфазной системе, что свидетельствует о малой величине скачка скорости звука на кривой насыщения при этих температурах.

При больших температурах величина скачка скорости становится столь значительной, что пренебрегать ею нельзя, и поэтому к скорости звука, вычисленной по



Фиг. 3

указанной формуле, необходимо прибавить величину скачка скорости звука при переходе через кривую насыщения. Анализ точности измерений, а также контрольные опыты с воздухом показывают, что ошибка измерения скорости звука во всем диапазоне температур не превышает 1%.

Сравнение результатов измерений на обеих установках, а также с полученными ранее [1] обнаруживает хорошее совпадение измеренных значений скорости звука.

Поступила 4 V 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В. П., Новиков И. И. Скорость звука на кривой фазового равновесия пар — жидкость. ПМТФ, 1960, № 1, стр. 58.
2. Авдонин А. В. Измерение скорости распространения звуковых волн в насыщенном паре воды. Ж. техн. физ., 1960, т. 30, № 10, стр. 1245.
3. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара, 6-е изд. Машгиз, Москва — Берлин, 1958.
4. Новиков И. И. Показатель адиабаты насыщенного водяного пара. Докл. АН СССР, 1948, т. 9, № 8, стр. 1425.

### НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ЛУЧИСТО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН НА ПРЯМОУГОЛЬНИКЕ

*А. Л. Бурка (Новосибирск)*

Рассматривается краевая задача для прямоугольной области  $[0 \leq x \leq L; 0 \leq y \leq l]$  со смешанными граничными условиями, включающими конвективные и лучистые потоки. (Температура окружающей среды предполагается равной нулю.)

В линейном приближении получено аналитическое решение для безразмерных лучистых потоков тепла. Математическая постановка задачи записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (0 \leq x \leq L, \quad 0 \leq y \leq l, \quad 0 \leq \tau < \infty) \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} - hT \right)_{x=0} = 0, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial x} + hT \right)_{x=L} = 0 \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = E_1(x, 0, \tau) = H [T^4(x, 0, \tau) - T_1^4] \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=l} = E_2(x, l, \tau) = H [T_2^4 - T^4(x, l, \tau)] \quad \left( H = \frac{\sigma_0}{\lambda_0} \right) \quad (4)$$

$$T(x, y, 0) = T_0$$

Здесь  $E_1, E_2$  — отношения результирующих потоков излучения к коэффициенту теплопроводности,  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $T_0$  — начальная температура области,  $T_1, T_2$  — температуры источников излучения  $h$  — относительный коэффициент теплоотдачи,  $\sigma_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности. Ниже рассматривается приближенное решение системы из двух нелинейных интегральных уравнений относительно результирующих плотностей излучения на сторонах прямоугольника.