УДК 534.29

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БИХРОМАТА КАЛИЯ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

К. Я. Сергеева

В последние 10—15 лет в практике предотвращения образования накипи на стенках паровых котлов и теплообменных аппаратов получил применение ультразвуковой метод [1—6]. Отличаясь невысокой стоимостью и простотой, ультразвуковое оборудование, при правильной эксплуатации обеспечивает безнакипный режим работы различных теплообменных аппаратов.

Существует ряд гипотез и предположений относительно механизма воздействия ультразвуковых колебаний на процесс образования накипи [5—7], однако до последнего времени нет экспериментальных работ, которые сколько-нибудь достоверно вскрыли физику этого явления.

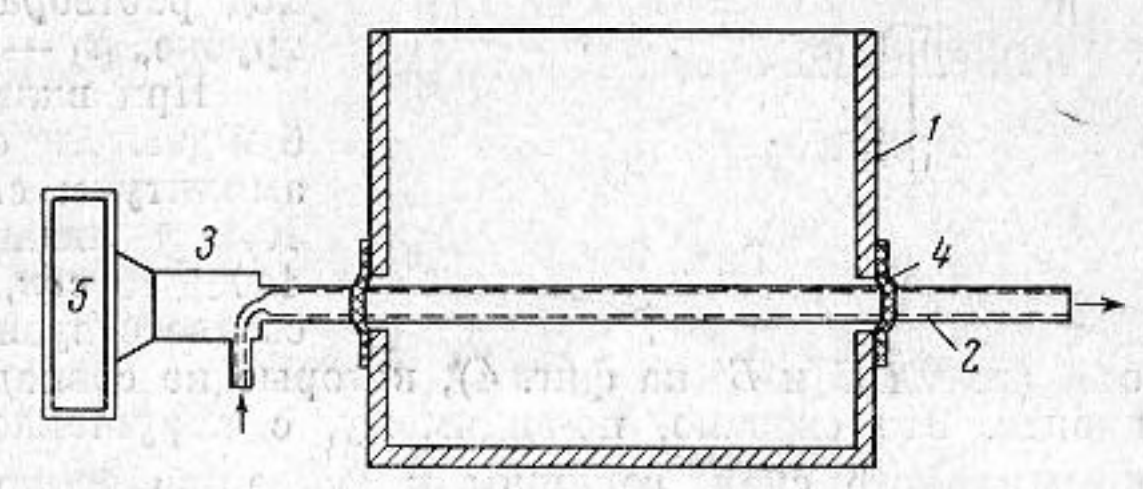


Рис. 1

Ниже приводятся предварительные результаты экспериментов, поставленных для выяснения механизма действия определенных типов ультразвуковых волн на кинетику процесса кристаллизации солей на теплообменной поверхности. В качестве модели был выбран процесс инкрустации, т. е. кристаллизации солей из горячих растворов на холодной поверхности, поскольку этот процесс проходит значительно быстрее и нагляднее, чем процесс накипеобразования. Образование накипи и инкрустацию на теплообменной поверхности можно до некоторой степени рассматривать как разновидность одного и того же процесса [8, 9].

При опытах была использована сильно инкрустирующая соль — двухромовокислый калий ($K_2Cr_2O_7$), растворимость которой с ростом температуры резко повышается от 110 *г/л* при 20° до 1030 *г/л* при 100°. Концентрация рабочего раствора $K_2Cr_2O_7$ в воде была выбрана равной 250 *г/л*.

На фиг. 1 и 2 дано схематическое изображение установок, на которых проводились опыты. Раствор бихромата калия с $t = 90°$ заливался в прозрачную кювету *1* из плексигласа. Кристаллизация $K_2Cr_2O_7$ из горячего раствора происходила на теплообменнике, в качестве которого была выбрана латунная трубка *2*, охлаждающаяся изнутри водой с $t = 5°$. Трубка являлась одновременно продолжением волновода *3* колебания в котором возбуждались магнитострикционным вибратором *5* на частоте 26 *кгц*.

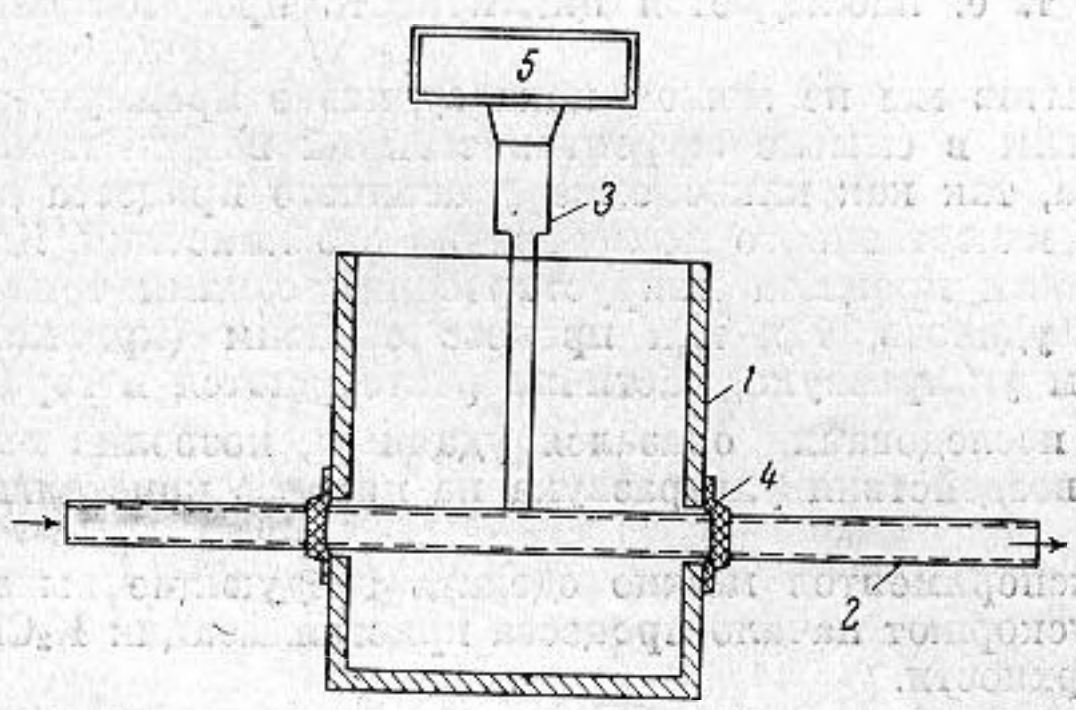


Рис. 2

Чтобы колебания передавались только по теплообменнику и не излучались в раствор через стенки кюветы, трубка соединялась с последней фланцем из вакуумной резины *4*. При помощи кинокамер РФК-1 и СКС-1 на кинопленке регистрировалась кинетика процессов, происходящих на поверхности теплообменной трубки, в которой возбуждались либо продольные (фиг. 1, $\lambda = 23$ *см*), либо поперечные (фиг. 2, $\lambda = 6$ *см*) стоячие волны. Приведенные ниже данные относятся к возбуждению колебаний трубки в непрерывном режиме. Распределение амплитуды смещений стоячих продольных волн определялось с помощью порошка талька; стоячих поперечных колебаний — виброметром УБВ-2. Амплитуда поперечных колебаний в пучности составляла 3—4 *мк*.

Первоначально была проведена киносъемка самого процесса кристаллизации бихромата калия на теплообменнике при отсутствии колебаний. При этом сначала на поверхности появляются одиночные кристаллы (фиг. 3), к которым затем при-

соединяются следующие, образуя постепенно плотный, довольно равномерный слой.

Ход процесса при наличии колебаний выглядит иначе. Его можно разделить на периоды, которые соответствуют началу процесса и уже установившемуся режиму.

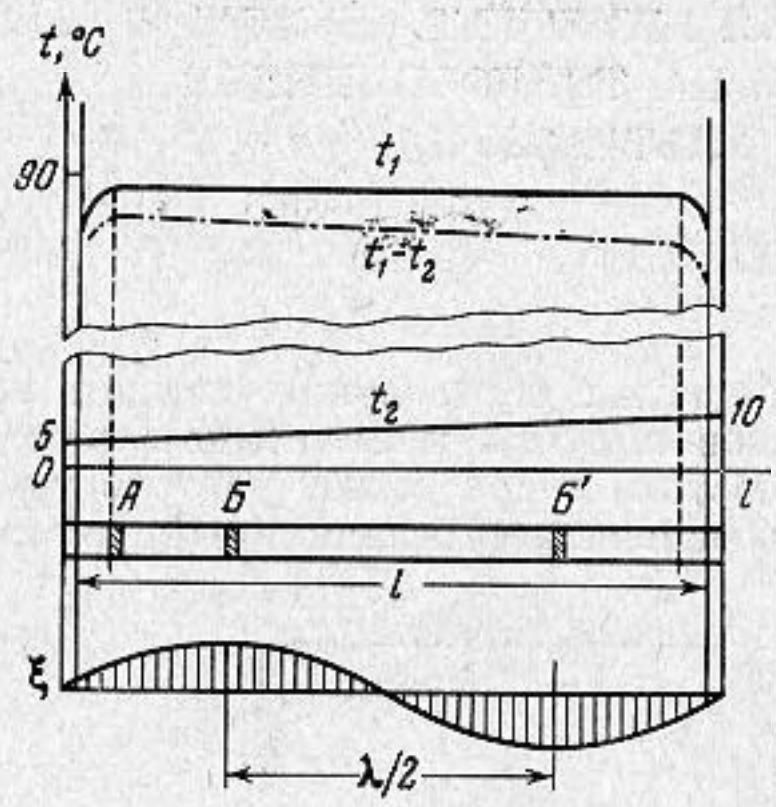


Рис. 4

В начале процесса ультразвук ускоряет процесс кристаллизации бихромата калия на поверхности трубки. Для наглядности на фиг. 4 представлены данные о распределении областей кристаллизации на поверхности трубки при возбуждении в ней ультразвуковых колебаний и без таковых. Когда колебания отсутствуют, процесс кристаллизации начинается через 180 ± ± 10 *сек* после пуска по трубке холодной воды и перемещается от начала трубки по ходу тока воды (точка *А* на фиг. 4), что очевидно, соответствует максимальному градиенту на поверхности (t_1 на фиг. 4 представляет температурный ход раствора в рабочей кювете, t_2 — воды в трубке, $[t_1 - t_2]$ — температурный градиент).

При включении ультразвука в трубке возбуждаются стоячие волны с распределением амплитуды смещения ξ, показанным на фиг. 4. Кристаллизация в этом случае начинается через 140 ± 10 *сек*, причем не в точке *А*, а в местах, соответствующих пучностям амплитуды смещений (точки *Б* и *Б'* на фиг. 4), которые не совпадают с точками максимального градиента. Это связано, по-видимому, с нарушением ультразвуковыми колебаниями пограничного слоя, ведущим к усилению теплообмена между горячим раствором и холодной стенкой трубки.

Далее осуществлялось наблюдение за установившимся процессом кристаллизации на всей поверхности трубки при возбуждении в ней продольных и поперечных стоячих волн. Как при первом, так и при втором типе колебаний была обнаружена прежде всего периодичность распределения по трубке мест отслаивания кристаллов, соответствующая узлам и пучностям амплитуды смещения (фиг. 5, 6). Наиболее интенсивно сбрасываются кристаллы в максимумах амплитуды смещения, которые указаны на фиг. 5, 6 стрелками.

Кадры фильма фиг. 7 соответствуют опыту, в котором осуществлялось наблюдение за установившимся процессом на небольшом участке теплообменной поверхности, соответствующем пучности амплитуды смещения стоячей продольной волны (размеры участка 0,64 *см* при λ = 23 *см*). Хорошо видно, что колебания не препятствуют отложению кристаллов на поверхности, которые образуют заметный слой; толщина его в какой-то момент времени больше, чем на соседних участках (кадр *а* фиг. 7), т. е. колебания способствуют ускорению процесса инкрустирования.

Однако слой, образовавшийся на этом участке, является более рыхлым (по сравнению со слоем кристаллов в местах, где колебания практически отсутствуют — в узлах смещений); при достижении определенной критической толщины он разрушается и отделяется от колеблющейся поверхности (кадры *б*, *в*, *г*, фиг. 7), после чего процесс начинается сначала, т. е. наблюдается цикличность процесса «нарастание — сбрасывание».

На основании проведенных опытов мы не можем пока судить о преимуществе одного типа колебаний перед другим в смысле эффективности их воздействия на отложение кристаллического осадка, так как киносъемка указанного процесса дала нам в основном возможность лишь качественного исследования его кинетики. Количественных данных при исследовании процесса инкрустирования солями теплообменной поверхности получить не удалось, так как процесс обратим (кристаллы, спадающие с трубки под действием ультразвука, частично растворяются в горячем растворе); однако в общем метод исследования оказался удачным, позволив выяснить ряд особенностей механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации.

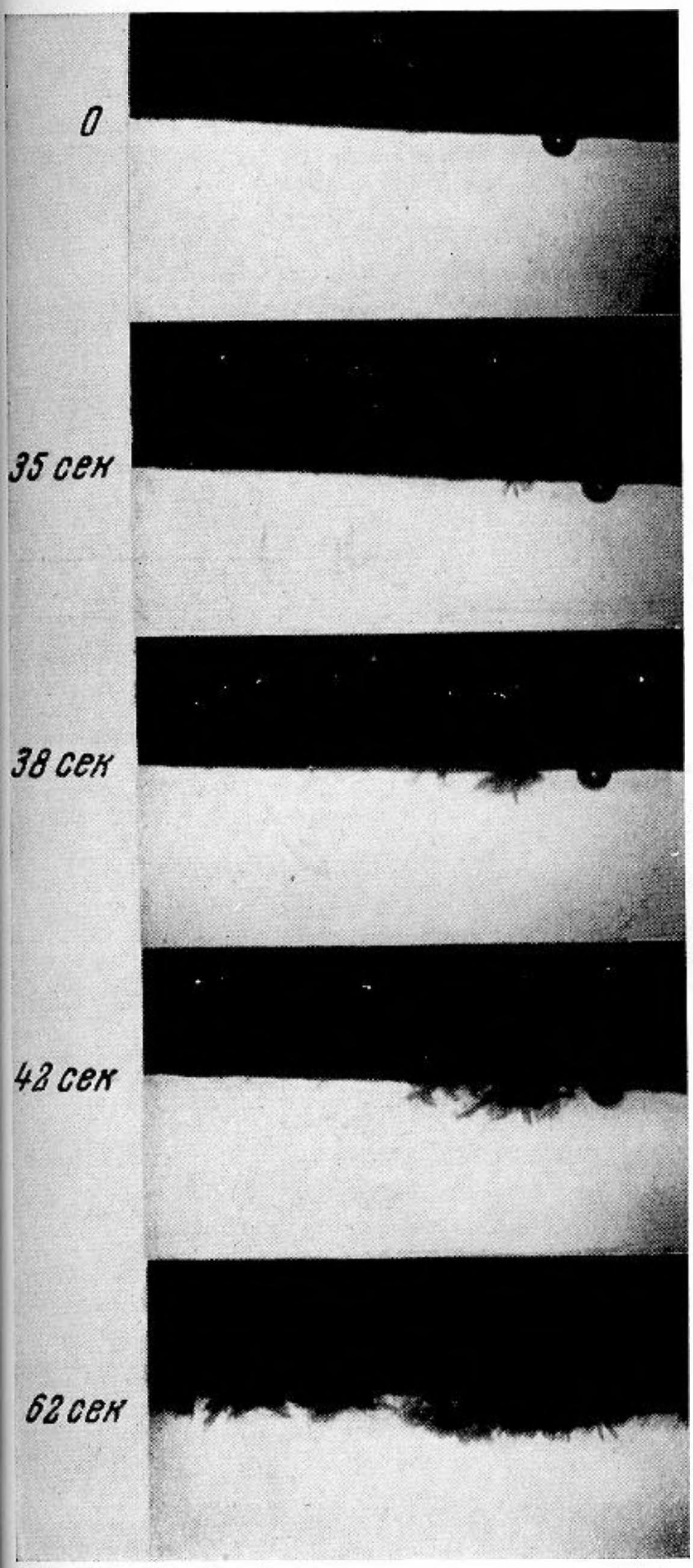
На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Ультразвуковые колебания ускоряют начало процесса кристаллизации $K_2Cr_2O_7$ из раствора на теплообменной поверхности.

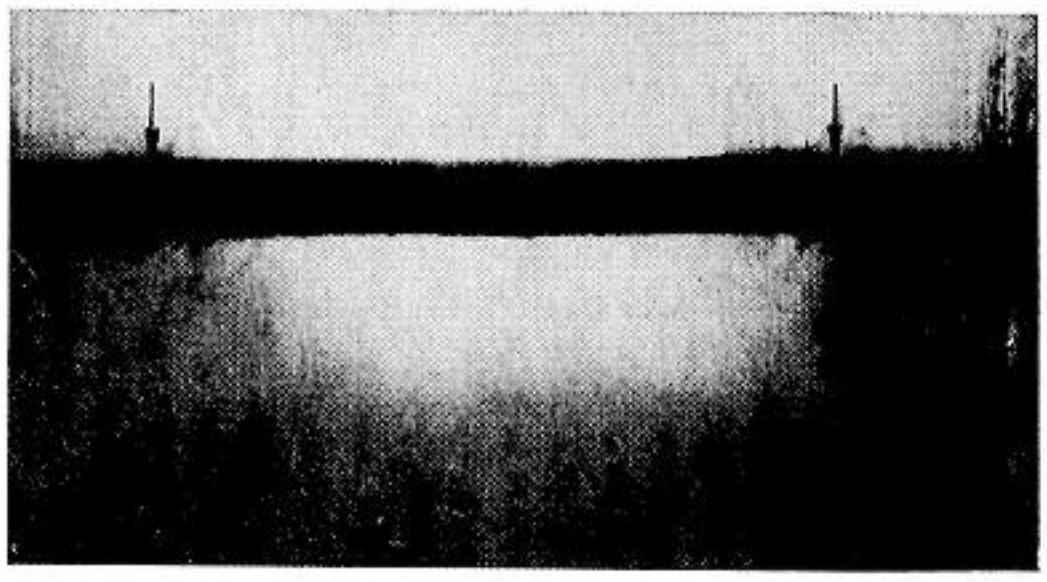
2. Ультразвук не предотвращает выпадение кристаллов на теплообменнике, но приводит к отслаиванию уже образовавшихся кристаллов, по достижении слоем некоторой критической толщины. Процесс «нарастание — сбрасывание» имеет циклический характер.

3. Как при продольных, так и при поперечных колебаниях, возбуждаемых в теплообменнике в пучностях смещения, наблюдается, с одной стороны, ускорение роста кристаллического слоя, с другой стороны, интенсивное сбрасывание образовавшихся кристаллов.

В заключение автор выражает признательность руководителю работы Л. Д. Розенбергу и благодарит А. А. Беляка за участие в проведении экспериментов.

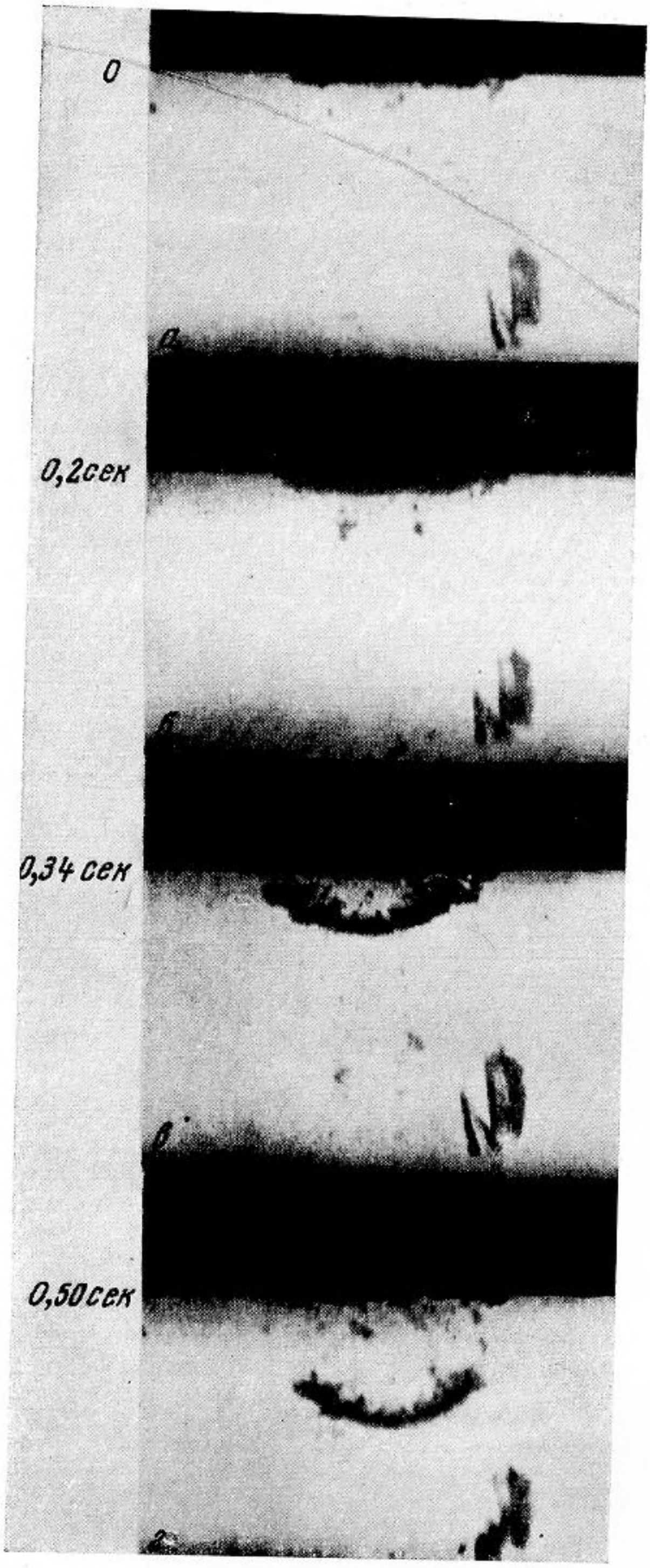


Фиг. 3



Фиг. 5

Фиг. 6



Фиг. 7

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Loosli. «Брит. патент», 1950, № 646882.
2. Л. Бергман. Ультразвук. М., ИЛ, 1956.
3. The Engineer. 1953, 1, 638—639.
4. Н. К. Лопырев. Ультразвуковое предотвращение образования накипи в судовых паровых котлах. Обмен опытом. Л., Речной транспорт, 1958.
5. Н. К. Лопырев. Предотвращение образования накипи ультразвуком. Сб. «Предотвращение котельной накипи ультразвуком», ДНТП, М., 1958, 3—14.
6. Е. П. Медников, В. Ю. Николаев. Ультразвуковые приборы для предотвращения котельной накипи и других кристаллических отложений, Сб. «Предотвращение образования котельной накипи ультразвуком», ДНТП, М., 1958, 15—27.
7. Е. П. Медников, В. Ю. Николаев. К вопросу о механизме разрушительного действия ультразвука на накипь. Сб. «Применен. ультраакуст. к исслед. вещества», МОПИ, М., 1960, 12, 45—51.
8. В. А. Зиннер, С. И. Ремпель, Ю. В. Тюрин. Применение ультразвука для предотвращения инкрустирования заводских кристаллизаторов. Сб. «Применен. ультразв. в хим.-технолог. процесс.», М., 1960, 214—220.
9. Н. В. Парфенова, В. М. Фридман, Г. Д. Щербакова. Исследование действия ультразвука на процесс осаждения кристаллов на теплообменной поверхности. «Безреагентная обработка питательной и котловой воды», Сб. 3, ДНТП, Л., 1962, 62—68.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
21 февраля 1967 г.

УДК 534.231.2

РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ИЗГИБНО КОЛЕБЛЮЩИХСЯ НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ ИМПЕДАНЦНЫМ МЕТОДОМ

В. В. Тютекин, А. П. Шкварников

В работе авторов [1] при рассмотрении изгибных колебаний неоднородных стержней были введены так называемые «внутренние» изгибные импеданцы $z_{ik}(x)$, связывающие соотношением $(5')_1$ * изгибающий момент $M(x)$ и перерезывающую силу $F(x)$ со смещением $W(x)$ и углом наклона $V(x)$. В настоящей заметке показано применение рассмотренного импеданцного метода к расчету резонансных частот изгибно колеблющихся неоднородных стержней.

Пусть имеется неоднородный стержень, один конец которого ($x = 0$) свободен, а второй ($x = L$) нагружен на некоторую импеданцную нагрузку z_{ik}^0 (для простоты будем считать ее чисто действительной и такой, что $z_{12}^0 = -z_{21}^0$). Тогда условия на границах для системы импеданцев $z_{ik}(x)$ будут

$$z_{ik}(0) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{M(L)}{B_0 k_0^2} = z_{11}^0 \frac{(L)}{k_0} + z_{12}^0 W(L),$$

$$\frac{F(L)}{B_0 k_0^3} = -z_{12}^0 \frac{V(L)}{k_0} + z_{22}^0 W(L). \tag{2}$$

Решая систему $(9)_1$ с начальными условиями (1), мы получим некоторые значения импеданцев $z_{ik}(x)$, которые при $x = L$ должны удовлетворять тем же соотношениям:

$$\frac{M(L)}{B_0 k_0^2} = z_{11}(L)\frac{V(L)}{k_0} + z_{12}(L) W(L), \quad \frac{F(L)}{B_0 k_0^3} = -z_{12}(L)\frac{V(L)}{k_0} + z_{22}(L) W(L). \tag{3}$$

Приравнивая правые части в выражениях (2) и (3), мы получаем линейную систему алгебраических уравнений относительно величин $V(L)$ и $W(L)$:

$$[z_{11}(L) - z_{11}^0]\frac{V(L)}{k_0} + [z_{12}(L) - z_{12}^0] W(L) = 0,$$

$$-[z_{12}(L) - z_{12}^0]\frac{V(L)}{k_0} + [z_{22}(L) - z_{22}^0] W(L) = 0. \tag{4}$$

---

* Обозначение $(\quad)_1$ всюду в дальнейшем относится к формулам работы [1].