

Ф. А. ИСАЕВ

## ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАССЕЙНЕ С ВОДОЙ

(Представлено академиком В. В. Шулейкиным 18 V 1971)

Термобарические волны в воздушных потоках с океана на материк были обнаружены В. В. Шулейкиным <sup>(1)</sup>. Однако за истекшие десятилетия не удалось записать точные уравнения, которым подчиняется этот процесс, виновный в самых суровых морозах зимой и в обострении засухи летом: до сих пор не уточнены чисто схематические уравнения <sup>(2)</sup>.

В то же время, возможность возникновения стоячих термобарических волн в экспериментальном (неподвижном) лотке была убедительно доказана Н. Л. Бызовой <sup>(3)</sup>, причем ее система оказалась автоколебательной.

В природных условиях улавливаются изменения метеорологических параметров — температуры воздуха, давления, скоростей ветра — в форме термобарических сейш, типичных для вращающейся системы, так как явление происходит в поле кориолисовой силы <sup>(2)</sup>. Поэтому большой интерес представляет исследование процессов, описанных в <sup>(3)</sup>, но во вращающемся бассейне с водой. Нами был построен такой бассейн <sup>(4)</sup>. Его диаметр составляет 160 см. Период вращения вокруг оси может регулироваться от 1 мин. до 0,45 мин., чтобы установить то же отношение периода термобарических колебаний к периоду одного оборота системы, какое наблюдается в природе; направление вращения против часовой стрелки. Общий вид установки представлен на рис. 1. Сверху бассейн закрыт крышкой, опускаемой до касания с налитой в него водой. Одна половина дна работает как нагреватель со ступенчатым изменением мощности тока от 0,94 до 4,4 квт. Накрест лежащая половина крышки служит холодильником с постоянной производительностью 1500 ки-

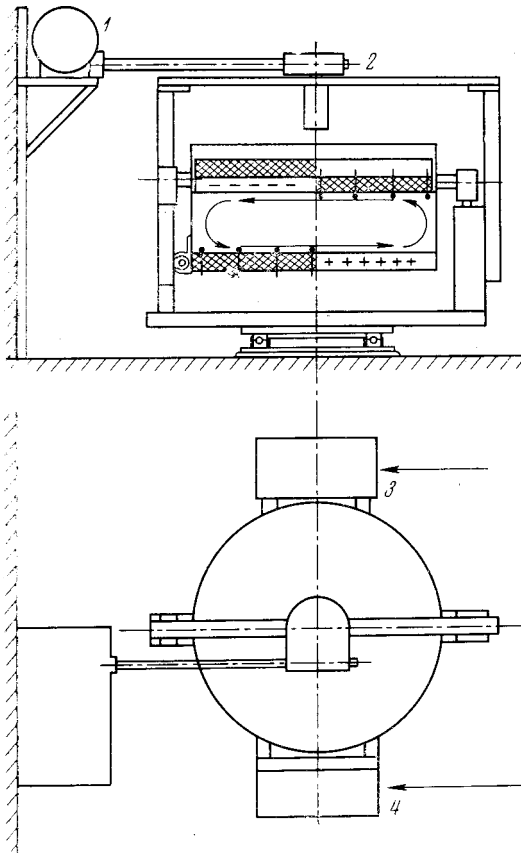


Рис. 1. Эскиз экспериментальной вращающейся установки. 1 — двигатель и первый редуктор, 2 — второй редуктор, 3 — холодильный агрегат, 4 — контрольный блок и осциллографы

бассейн закрыт крышкой, опускаемой до касания с налитой в него водой. Одна половина дна работает как нагреватель со ступенчатым изменением мощности тока от 0,94 до 4,4 квт. Накрест лежащая половина крышки служит холодильником с постоянной производительностью 1500 ки-

лофригорий в час. Глубина водного слоя  $H$  постоянна и равна 24 см, она выбрана в соответствии с оптимальным значением критерия Бызовой:  $0,1 \leq H/D \leq 0,2$ , где  $D$  — диаметр бассейна. Нейтральные половины днища и крышки, выполненные из пенопласта, имеют по 35 гнезд для размещения термодатчиков в толще деятельного слоя воды. В качестве датчиков использованы термисторы ММТ-1 ( $R = 1$  ком, ТКС = 2,4%). Запись производится на осциллографе Н-700 особочувствительными шлейфами (ГБ-IV-B-2,  $S_i = 10000 - 15000$  мм(ма)м). Зайчик отклоняется на осциллографной ленте на 125 мм при изменении температуры в точке измерения на  $1^\circ$  с некоторыми колебаниями относительно указанной величины в зависимости от реальной чувствительности шлейфа.

Поскольку периоды исследуемых колебаний температуры составляют несколько минут, протяжка ленты, после несложной переделки стандартной кассеты осуществляется со скоростью 1 см/мин.

Угловая скорость вращения в каждом эксперименте устанавливалась с таким расчетом, чтобы период одного оборота ( $T_1$ ) в точности соответствовал  $1/8$  периода существующих в данных условиях автоколебаний ( $T_2$ ). Скорость непрерывно контролировалась и оставалась постоянной даже в продолжение 12 час. непрерывной работы. Устойчивые автоколебания температуры и скоростей движения в конвекционных потоках создаются в неподвижном бассейне через 2 час. после включения обоих энергопродуктов (нагревателя и холодильника) или через 4 часа после включения любого из них в отдельности. Во вращающемся бассейне автоколебания устанавливаются лишь через 6—7 час.

К сожалению, до сих пор не удавалось получить в круглом вращающемся бассейне узловые линии термобарических сейш, аналогичные тем, которые возникают в системе океан — атмосфера — материк <sup>(2)</sup>: по-видимому, оказались невыполненными условия интерференции падающих и отраженных волн и явление полностью замаскировано колебаниями турбулентного характера. Поэтому опыты были проделаны в двух иных вариантах: в цилиндрическую оболочку бассейна вписывались ограничительные стенки, создававшие в плане либо квадрат со сторонами 112 см, либо прямоугольник  $140 \times 70$  см. Для уменьшения турбулизации потока включался лишь один источник конвекции — холодильник. Это было сопряжено с непрерывным падением температуры во всем объеме воды, и исследуемые колебания налагались на подобный монотонный ход температуры. Для расшифровки таких осложненных записей на осциллографной ленте нами был сконструирован специальный планшет <sup>(4)</sup>. Он дает возможность автоматически вычерчивать кривые изменения полезных сигналов от нескольких датчиков в нужной последовательности, освободившись от фона, вызванного непрерывным охлаждением всей воды в пределах квадратного или прямоугольного бассейна.

На рис. 2а вверху изображена рабочая часть бассейна в плане. Знак + поставлен над той половиной, которая соответствует бездействовавшему нагревателю. Знак — показывает половину, соответствующую действовавшему холодильнику. Генерируемые термобарические волны бежали в направлении от — к +, следовательно, датчик А был расположен на «правом берегу», а датчик В — на «левом». Серия регистраций 1 — одна из полученных при отсутствии вращения бассейна. Здесь, в неподвижной системе, амплитуды колебаний температуры в точках А и В практически одинаковы. Совсем иная картина получается при вращении бассейна: номером 2 отмечена одна из записей, полученных в таких условиях. Ясно видно, что амплитуда колебаний близ «правого берега» возросла, а близ «левого берега» — на основном протяжении записи — близка к нулю. Тут несомненно проявился эффект Кельвина, обусловленный воздействием кориолисовой силы. Действительно, и по теоретическим соображениям <sup>(2)</sup>, и на основании опытов в неподвижном бассейне <sup>(3)</sup> колебания температуры в конвекционных потоках должны быть связаны с со-

ответствующими колебаниями скоростей. С другой стороны, хорошо известно, что, например, колебания скоростей приливных течений в поле кориолисовой силы должны подчиняться уравнению

$$u = a \frac{c}{H} \exp\left(-\frac{2\bar{\omega}}{c} y\right) \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right). \quad (1)$$

Здесь  $c$  — скорость распространения волны,  $\bar{\omega}$  — проекция угловой скорости вращения Земли на вертикаль в данной точке,  $y$  — расстояние от правого берега канала, по которому распространяется волна. В нашем слу-

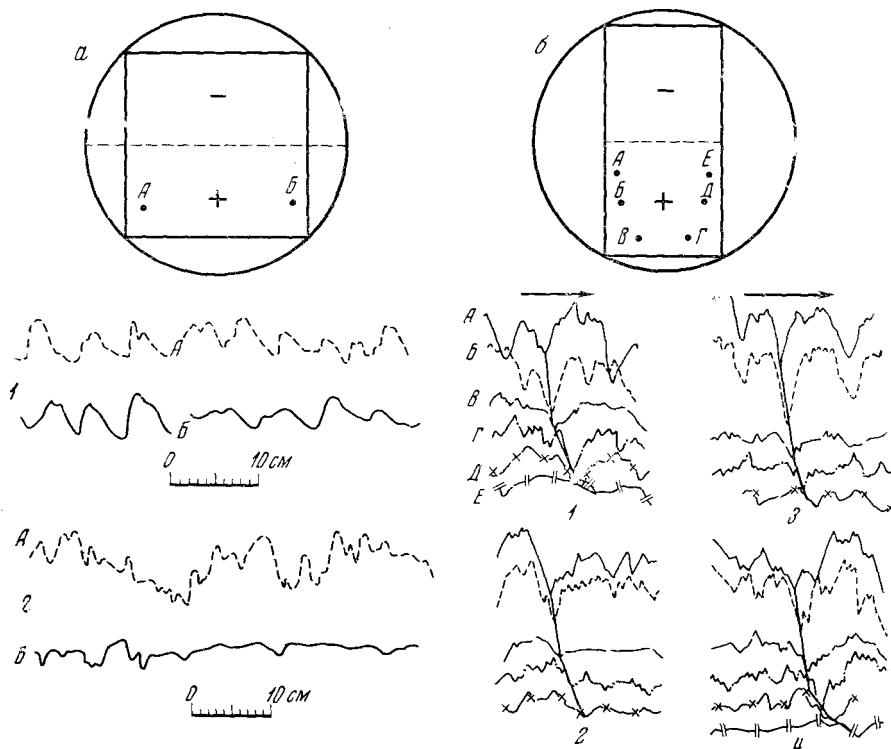


Рис. 2. Моделирование эффектов Кельвина (а) и Тейлора — Дефанта (б) в потоках тепловой конвекции

чае под знаком экспоненты окажется угловая скорость вращения бассейна  $\omega = 2\pi/T_1$ , где  $T_1$  — период одного оборота. На основании (3) можно положить  $c = 2L/T_2$ , где  $T_2$  — период автоколебаний, а  $L$  — длина стороны квадрата на плане (рис. 2а), наконец,  $y = L$ .

Следовательно, выражение экспоненциальной функции, входящей в уравнение (1), будет

$$\exp\left[-\frac{2\bar{\omega}}{c} y\right] = \exp[-\bar{\omega}T_2] = \exp\left[-2\pi \frac{T_2}{T_1}\right]. \quad (2)$$

Но и в природе, и в проделанных опытах можно считать  $T_1/T_2 = 8$ . Следовательно, показатель степени при  $e$  достигал бы громадной величины ( $-50$ ), если бы теория Кельвина была в точности применима к каналу, у которого ширина равна длине. В действительности, записанные соотношения не могут дать точных результатов в наших условиях. Но во всяком случае они оправдывают резкое уменьшение амплитуды колебаний «у левого берега» в системе рис. 2а.

После получения этого — первого — эффекта кориолисовой силы было имитировано явление, впервые описанное Тейлором применительно к

приливам во вращающемся прямоугольном бассейне (<sup>5</sup>, <sup>2</sup>). В его бассейне, длина которого вдвое превышала ширину, возникали две амфидромические точки, вокруг которых обегали волны прилива (одна амфидромия в одной половине прямоугольника, другая — в другой его половине).

На рис. 2б, вверху, изображен план рабочей части бассейна во втором варианте опытов. Обозначения + и — прежние. На рис. 2б, внизу, представлены четыре записи из большой серии подобных. Кривые везде обозначены теми же большими буквами от А до Е, которые проставлены на верхнем плане при точках, где помещались соответствующие датчики. Как видно, всюду наблюдается сдвиг фаз между колебаниями температуры воды в этих точках. Значит, термобарические волны обегают вокруг амфидромий в полном соответствии со схемой Тейлора.

Таким образом, смоделированы два природных явления, имевших до того лишь математическое толкование, из чего следует, что создаваемые в установке автоколебания средней температуры и скорости активного слоя при наложении определенного режима вращения ведут себя подобно приливным волнам, т. е. как волны достаточно долгопериодные.

Следовательно, помимо собственного значения описанных эффектов, эксперименты на вращающейся установке определили новую возможность возбуждения и уверенной регистрации устойчивых долгопериодных колебаний в водной среде; по своей природе регистрируемые автоколебания ближе всего к термобарическим.

Разумеется, в настоящее время еще рано судить о том, каким образом проявится эффект кориолисовой силы в формах узловых линий, безусловно существующих при сложных колебательных процессах в активном слое: по всей вероятности, эти формы могут оказаться так же неустойчивы, как формы узловых линий в опытах Хладни с вибрациями металлических пластинок.

Экспериментальное отделение  
Морского гидрофизического института  
Академии наук УССР  
Кацивели, Крым

Поступило  
12 V 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. В. Шулейкин, ДАН, 22, № 7 (1939). <sup>2</sup> В. В. Шулейкин, Физика моря, М., 1968. <sup>3</sup> Н. Л. Бызова, ДАН, 72, № 4 (1950). <sup>4</sup> Ф. А. Исаев, Моделирование режима тепловой конвекции в поле кориолисовой силы. Морские гидрофизические исследования, № 1 (47) (1970). <sup>5</sup> G. Taylor, Proc. Lond. Math. Soc., Ser. 2, 20, 148 (1921).