

В. И. ЧУПРЫНИН

САМОВОЗБУЖДАЮЩИЕСЯ КОЛЕБАНИЯ ПРИ ТЕПЛОМ И ВРАЩАТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СЛОЙ ВОДЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

(Представлено академиком В. В. Шулейкиным 10 I 1975)

Взаимодействие полей температуры и скорости в явлениях свободной конвекции часто приводит к возникновению автоколебаний. Мало исследованным, но очень важным с геофизической точки зрения является вопрос о самовозбуждении и распространении колебаний в конвективных системах, подверженных силам, создающим вращение. Опыты Ф. А. Исаева ⁽¹⁾ свидетельствуют о сложности физических процессов, протекающих в подобных автоколебательных системах.

Автором проведены лабораторные эксперименты в слое воды толщиной 8,5 см, заполняющей цилиндрический бассейн диаметром 50 см (рис. 1). На противоположных сторонах бассейна непосредственно в воде помещены нагреватель H (трубчатый электронагревательный элемент) и холодильник X (змеевик, по которому прогоняется холодная вода). Мощности нагревателя и холодильника задавались в пределах 300–400 Вт. Бассейн с источником и стоками тепла неподвижен. Воздушный поток, создаваемый крыльчаткой K , установленной над водной поверхностью, задает вращение воды в горизонтальной плоскости по часовой стрелке. Предусмотрена возможность изменения скорости вращения крыльчатки. Период обращения T частиц воды на поверхности вокруг оси цилиндра измеряли с помощью поплавков. Датчиками температуры служили термисторы ММТ-1. Запись производили на потенциометрах ЭПП-09.

После запуска установки в течение 1–1,5 час. осуществляется переход системы к стационарному режиму. При включении только нагревателя и холодильника наблюдается конвективная циркуляция, на фоне которой не обнаруживаются периодические колебания температуры и скорости воды. Наличие вращения во всем исследовавшемся диапазоне значений T (от 40 до 8 сек.) практически сразу приводит к появлению периодических колебаний, наблюдаемых в стационарном и нестационарном режимах. Характер поведения системы в зависимости от скорости вращения позволяет выделить два диапазона значений T : от 40 до 15 сек. и от 18 до 8 сек. В первом диапазоне наблюдаются колебания с периодами 80–140 сек. Зависимость, представленная на рис. 2, показывает, что при $T=23$ –26 сек. колебания имеют наибольшую амплитуду и наименьший период, причем здесь они наиболее устойчивы. В промежутке между диапазонами ($T=13$ –15 сек.) периодические колебания выражены очень слабо. Во втором диапазоне

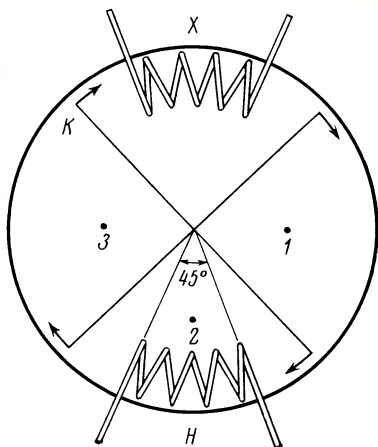


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

преобладают более высокочастотные колебания с периодами 30–40 сек., на которые накладываются низкочастотные с незначительной амплитудой. Складывается впечатление, что воздействие вращения на конвективную систему подобно воздействию периодической вынуждающей силы на свободную неконсервативную колебательную систему, обладающую несколькими степенями свободы с наличием резонансов на нескольких частотах.

Слабая устойчивость высокочастотных колебаний пока не позволяет исследовать их детально, поэтому дальнейшие результаты, если специально не оговорено, относятся к первому из указанных диапазонов.

Одновременные измерения температуры воды в различных точках показывают, что колебания распространяются в направлении, совпадающем с

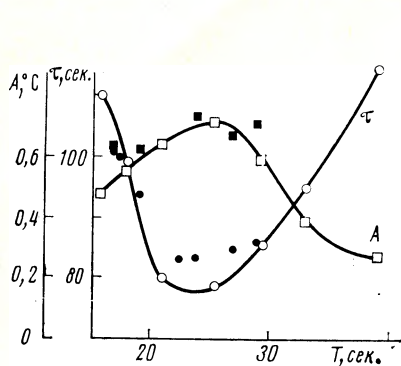


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость периода τ и амплитуды A колебаний от периода обращения T . Светлыми кружками нанесены значения τ , квадратами — значения A . Кривые проведены через точки, полученные в одном из опытов. Результаты других опытов изображены черными кружками и квадратами. Измерения проведены в точке 1 (см. рис. 1) на глубине 2,5 см

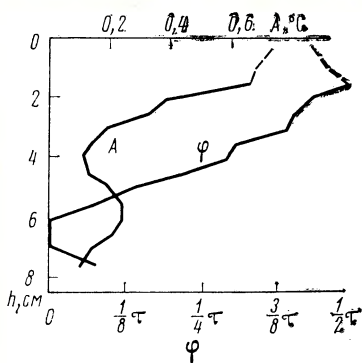


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость амплитуды A и фазы ϕ колебаний от глубины h . На всех глубинах колебания по фазе запаздывают по отношению к глубине 6 см, где значение фазы принято равным нулю. $\tau=98$ сек.

направлением вращения. Датчики температуры, установленные на одной и той же глубине в точках 1, 2 и 3 (рис. 1), фиксируют колебания, идущие в диаметрально противоположных точках бассейна (1 и 3) в противофазе, а в точке 2 колебания запаздывают по отношению к 1 на $1/4$ периода. Это означает, что бассейн по диаметру можно разделить на две области, в одной из которых температура воды повышена относительно средней, в другой — понижена. Вся эта система непрерывно поворачивается по часовой стрелке. Измерения по вертикали четко регистрируют опережение по фазе колебаний температуры в нижних слоях по отношению к верхним, за исключением поверхностного и придонного слоев толщиной примерно 1,5 см (рис. 3). Из-за значительных неперіодических флуктуаций в верхнем слое данные измерений на горизонтах 0,5 и 1 см менее надежны и поэтому на рис. 3 показаны штриховой линией. На глубинах 1,5 см и 6–7 см колебания идут в противофазе. Здесь же амплитуда колебаний достигает максимальных значений.

В придонном слое воды проведены визуальные наблюдения за колебаниями подкрашенной струи, образующейся при растворении марганцево-кислого калия, кристаллы которого помещали в держателях на расстоянии 1–3 см от дна. Установлено, что в любой точке придонного слоя вектор скорости течения вращается по часовой стрелке, причем время одного полного оборота равно периоду колебаний температуры, регистрируемой термистром. В фиксированный момент времени во всех точках выбранного горизонта, за исключением близких к стенке бассейна, течение имеет одно и то же направление. Одновременные измерения колебаний температуры и скоро-

сти показывают, что течение всегда направлено от области, в которой температура понижена, к области с повышенной температурой, но не перпендикулярно к диаметру, разделяющему области, а сдвинуто относительно этого перпендикуляра на некоторый угол (в пределах $0-45^\circ$) против часовой стрелки.

Колебания появляются и в том случае, если холодильник не погружен в жидкость, а охлаждается часть стенки бассейна в противоположной от нагревателя стороне. То же наблюдается при включении только одного нагревателя.

Рассмотренные колебания по своей природе наиболее близки к термобарическим сейшам, наблюдаемым в атмосфере ⁽²⁾. Аналогия обнаружива-

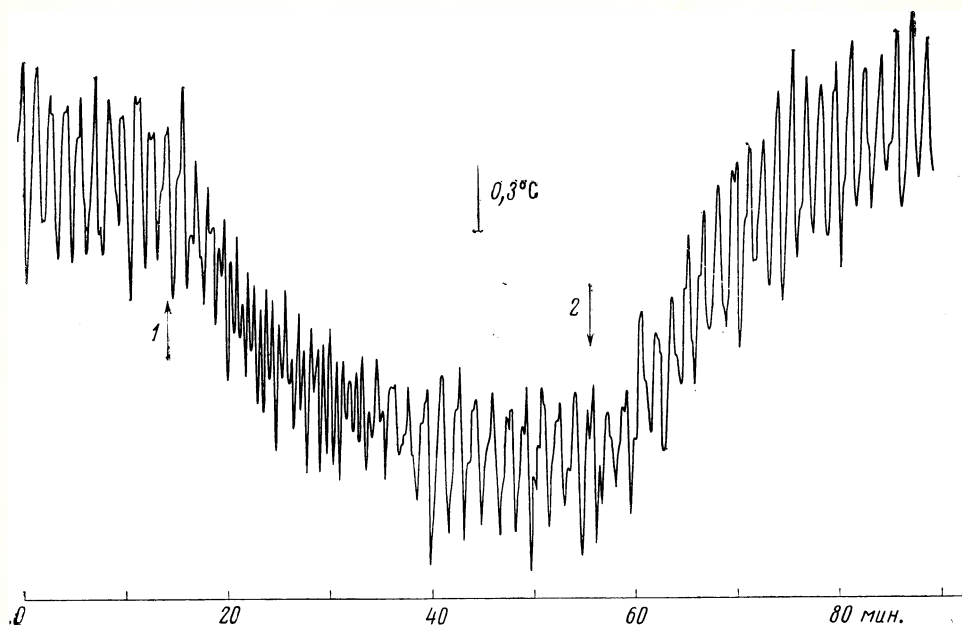


Рис. 4. Реакция системы на изменение вращения. До момента времени, отмеченного стрелкой 1, период обращения равен 27 сек. Затем он резко уменьшен до 19 сек. В момент времени, отмеченный стрелкой 2, период обращения увеличен до 29 сек. Данные получены в точке 1 (рис. 1) на глубине 2,5 см

ется в формировании так называемой одноузловой сейши, узловой диаметр которой систематически поворачивается. Как и в теоретических расчетах В. В. Шулейкина, вектор скорости в выбранной точке непрерывно вращается. Вращение, задаваемое сверху воздушным потоком, поворот узлового диаметра и вектора скорости происходят в одном направлении, что полностью согласуется с теорией термобарических сейш. Подобие процессов, происходящих в лабораторном эксперименте и в атмосфере, позволяет сделать частный вывод о возможности моделирования некоторых крупномасштабных атмосферных процессов в невращающихся бассейнах, с заданием вращения сверху. В конструктивном отношении такие модели значительно проще, чем те, в которых используется вращающийся бассейн.

Переключение системы из режима с относительно низкой скоростью вращения в режим более высоких скоростей обычно сопровождается переходным процессом с появлением высокочастотных колебаний, имеющих периоды 30–40 сек. (рис. 4). Чаще всего это наблюдается при резком изменении скорости вращения от $T=20$ сек. и более к $T=15-19$ сек. Обратный переход к низким скоростям, как видно на рис. 4, происходит без появления высокочастотных колебаний.

Возникающие в переходном процессе колебания похожи на упоминавшиеся выше высокочастотные колебания, фиксируемые во втором из выделенных диапазонов значений величины T . В верхних слоях воды данные колебания по направлению распространения совпадают с низкочастотными. Датчики температуры, установленные на одинаковой глубине в точках 1 и 3, регистрируют высокочастотные колебания, совпадающие по фазе. В точке 2, по отношению к 1 и 3, они находятся в противофазе. Отсюда следует, что в бассейне на фоне среднего температурного поля формируются четыре области с чередованием знака температурных отклонений, которые разделены двумя взаимно перпендикулярными диаметральными линиями, вращающимися по часовой стрелке. По-видимому, колебания в переходном режиме, как и колебания во втором из диапазонов T , возникают в результате развития аналога четырехполюсных термобарических сейш, встречающихся в атмосфере ⁽²⁾.

В. В. Шулейкин ⁽²⁾, рассматривая возможную причину возникновения в атмосфере колебаний скорости ветра с периодом 72–73 суток, связывает ее с существованием в северном полушарии зональных воздушных потоков. При наличии океанов и материков, являющихся своего рода нагревателями и холодильниками, в таких потоках могут возникать автоколебания. Описанную выше лабораторную установку мы рассматриваем как качественную модель данного явления. Задаваемое с поверхности вращение воды является аналогом зональных потоков в атмосфере, которые на больших высотах образуют по существу единый, охватывающий большую часть полушария циклонический вихрь с центром у полюса. Приводимые в ⁽²⁾ годографы периодических колебаний скорости ветра на трех уровнях в атмосфере очень похожи на получаемые в лабораторных условиях, причем подобие сохраняется и в том, что заданное с поверхности воды направление вращения (циклональный вихрь в атмосфере) и направление вращения векторов скорости совпадают. Как и в атмосфере, в модели наблюдается запаздывание по фазе колебаний с высотой. Данная аналогия не является случайной и, по-видимому, указывает на то, что самовозбуждающиеся колебания в зональных воздушных потоках следует рассматривать как разновидность термобарических сейш.

Дальневосточный государственный
университет
Владивосток

Поступило
24 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ф. А. Исаев, ДАН, т. 201, № 5, 1088 (1971). ² В. В. Шулейкин, Физика моря, М., «Наука», 1968.