

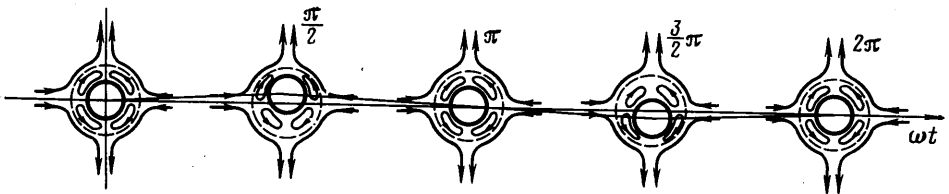
УДК 536.24:534.222

О ТЕЧЕНИЯХ ОКОЛО КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА

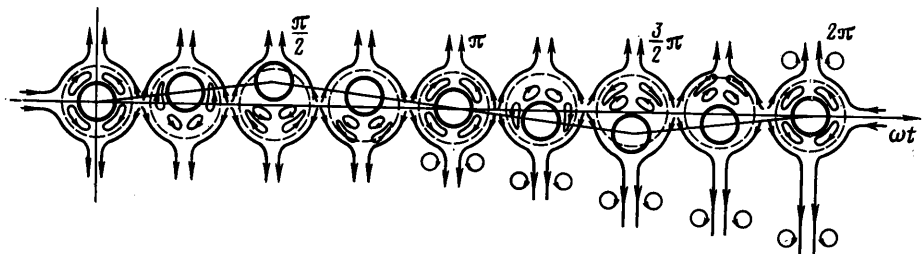
СОРОКОДУМ Е. Д.

Приводятся результаты экспериментальных исследований изменения структуры вторичных стационарных течений около колеблющегося в покоящейся жидкости в направлении, перпендикулярном своей оси, кругового цилиндра в широком интервале амплитуд колебания при больших числах Рейнольдса. При амплитудах колебания меньших диаметра цилиндра, наряду с вязкими волнами четыре вихря зарождаются около поверхности цилиндра и четыре стационарных течения в отдалении от него. В течение периода колебания вихри около цилиндра меняют свою форму и месторасположение. При амплитудах колебания, соизмеримых с диаметром цилиндра, вихри отрываются и образуют две вихревые дорожки. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний дорожки раздваиваются.

Около плоской стенки, совершающей в своей плоскости гармонические колебания, возникают быстрозатухающие вязкие волны [1]. Около колеблющихся тел с конечной кривизной поверхности, например кругового цилиндра, возникают наряду с вязкими волнами вторичные стационарные течения [1, 2]. Вторичные стационарные течения имеют вихревой характер и эти течения качественно различны между



Фиг. 1



Фиг. 2

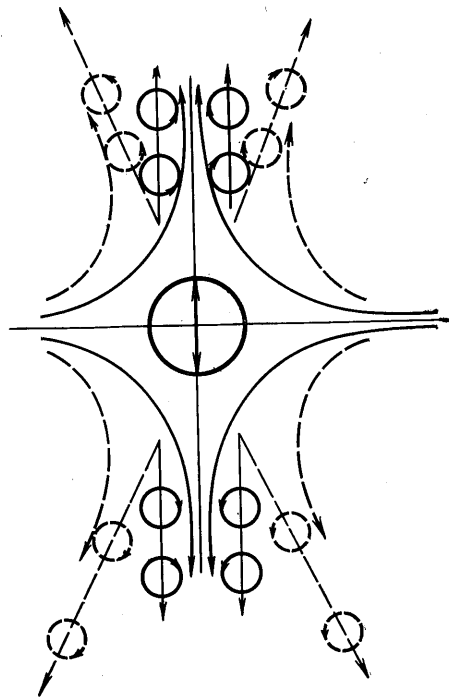
собой для случаев малых и больших колебательных чисел Рейнольдса $Re = S\omega d/\nu$, где S — амплитуда колебания цилиндра, $\omega = 2\pi f$, f — частота колебания, ν — кинематическая вязкость среды, d — диаметр цилиндра. Установлено [3], что при $Re \approx 10$ происходит переход от структуры вторичных стационарных течений, присущих малым числам Re , к течениям при больших числах Re . Теоретические и экспериментальные исследования вторичных стационарных течений ограничиваются областью малых амплитуд колебания [2, 4].

В данной работе приводятся результаты исследования качественных изменений структуры вторичных стационарных течений при больших числах Рейнольдса в зависимости от амплитуды колебаний. Визуализация течений проводилась с помощью мелкого порошка (серебрянки), освещенного стробоскопическим светом. Стробоскопический осветитель давал вспышки света длительностью около 10^{-5} с в одной и той же фазе колебания цилиндра. Каждая частица среды и вместе со средой и частицы серебрянки вовлекались двумерными вязкими волнами и индуцируемыми ими стационарными течениями в сложное колебательное движение, имеющее траекторию, близкую к эллиптической с наложенным на нее стационарным движением. При «чисто» колебательном движении среды частицы серебрянки через полный период колебания возвращались на прежнее место, и в стробоскопическом свете они наблюдались как «неподвижные» точки. Если в среде, окружающей колеблющийся цилиндр, наряду с колебательными компонентами движения индуцировалась постоянная во времени составляющая, то частица при каждой новой вспышке света наблюдалась в новом месте. Объединяя места фиксации в стробоскопическом освещении движения одной и той же частицы, можно построить траекторию стационарной составляющей течения для данной фазы колебания.

При малых амплитудах колебания около колеблющегося цилиндра возникают только вязкие волны, а стационарные течения не наблюдаются. При плавном увеличении амплитуды колебания при определенных пороговых значениях $2S < d$ наряду с вязкими волнами наблюдается зарождение вторичных течений около цилиндра. Зародившиеся течения представляют собой четыре вихря непосредственно около поверхности цилиндра и четыре стационарных течения в отдалении от него (фиг. 1). При плавном понижении амплитуды колебаний исчезновение вихрей происходит при меньших значениях амплитуды, чем их зарождение. Таким образом, порог образования стационарных течений имеет гистерезисный характер. Другой особенностью перехода через порог, при котором зарождаются вихри, было то, что при подходе к пороговым значениям S достаточно небольшого увеличения амплитуды колебаний, чтобы «мгновенно» образовалась устойчивая структура вторичных стационарных течений, а при уменьшении амплитуды происходила «мгновенная» потеря устойчивости и исчезновение этой структуры течений.

В течение периода колебания в зависимости от фазы колебания вихри около тела меняют свое месторасположение и форму [5], но не пересекают внешнюю неподвижную границу, которая представляет собой круг (пунктирный круг на фиг. 1) с центром в точке, около которой происходит колебание. Вязкие волны затухают не доходя до этой границы, течения вне этой границы имеют только стационарную компоненту движения. Внутри неподвижной границы движение жидкости состоит из периодического движения, вызванного вязкими волнами, генерируемыми колеблющимся цилиндром, и стационарными вихрями, индуцируемыми вязкими волнами.

При дальнейшем увеличении амплитуды колебания смещение вихрей внутри неподвижной границы увеличивается и вихри начинают проникать через неподвижную границу ($2S \approx d$). Кинематика вихрей для этого случая показана на фиг. 2. Наиболее интересным моментом является то, что после максимального отклонения цилиндра при последующем движении к среднему положению ($\pi/2 < \omega t < \pi$, t — время) пара вихрей, проникнувшая через неподвижную границу, уже не возвращается к своему начальному положению, как это было в случае, показанном на фиг. 1, а выходит за пределы границы, т. е. отрывается. Неподвижная граница при этом разрушается. Оторвавшаяся пара вихрей увлекается внешними стационарными течениями; отметим здесь, что даже если бы этих течений не было, то эта пара в силу взаимодействия между собой при данном направлении вращения вихрей все равно перемещалась бы от цилиндра вдоль направления колебания. Через половину периода ко-



Фиг. 3

лебания происходит аналогичным образом отрыв другой пары вихрей, движущейся вдоль направления колебания цилиндра, но по другую сторону от него. Зарождение новой пары вихрей на месте оторвавшейся происходит за малую долю периода. Переход от безотрывного вторичного вихревого течения (фиг. 1) к течению, сопровождающемуся регулярным отрывом вихрей, происходит сразу при увеличении амплитуды колебания выше некоторого порога, при которой происходит отрыв вихрей. Таким образом, с увеличением амплитуды колебания, когда вихри начинают проникать через неподвижную границу, происходит потеря устойчивости прежних течений и образуется новая устойчивая структура течений. При понижении амплитуды колебания новая структура течений разрушается, т. е. прекращается отрыв вихрей при меньших амплитудах колебания, чем при тех, при которых происходит отрыв, т. е. порог отрыва вихрей имеет гистерезисный характер. Оторвавшиеся пары вихрей образуют по обе стороны цилиндра симметричные дорожки (фиг. 3). При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний дорожки раздваиваются (новое расположение вихрей показано пунктиром на фиг. 3).

Описанные качественные изменения структуры вторичных стационарных течений наблюдались в различных средах (вода, воздух, трансформаторное масло) при диаметрах цилиндров от 3 до 10 мм, частотах от 5 до 100 Гц, как при колебании цилиндра в неподвижной среде, так и при колебании среды около неподвижного цилиндра. Например, в воздухе при частоте 20 Гц около цилиндра диаметром $d=3$ мм зарождение вихрей при повышении амплитуды колебания наблюдалось при $S=0,75$ мм, исчезновение вихрей — при понижении амплитуды колебания при $S=0,6$ мм, отрыв вихрей и образование вихревой дорожки — при повышении амплитуды колебания при $S=2,5$ мм, прекращение отрыва вихрей — при понижении амплитуды колебаний при $S=1,5$ мм. Отрыв вихрей наблюдался во всех средах, но структура вихревой дорожки четко наблюдалась только в трансформаторном масле (например, для $d=5$ мм, $f=10$ Гц, $S=7,5$ мм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Зарембо Л. К. Акустические течения. — В кн.: Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968, с. 87–128.
3. Andres J. M., Ingard U. Acoustic streaming at high Reynolds numbers. — J. Acoust. Soc. Amer., 1953, v. 25, № 5, p. 932–938.
4. Сорокодум Е. Н., Сорокодум Е. Д., Вильдт Е. О. Аэрогидродинамика механических и биологических колебательных систем. — В кн.: Библиограф. указ. М.: БЕН АН СССР, 1977.
5. Сорокодум Е. Д., Тимошенко В. И., Швец Г. В. Динамика развития акустических течений около осциллирующих тел при больших амплитудах. — Тр. Таганрогского радиотехн. ин-та, 1973, т. 5, в. 34, с. 96–105.

Таганрог

Поступила в редакцию
22.XII.1980

Технический редактор Е. В. Сипицына

Сдано в набор 17.05.82 Подписано к печати 09.07.82 Т-09888 Формат бумаги 70×108/16
Высокая печать Усл. печ. л. 16,8 Усл. кр.-отт. 29,2 Уч.-изд. л. 19,1 Бум. л. 6,0
Тираж 1720 экз. Зак. 1663

Издательство «Наука». 103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука». 121099, Москва, Шубинский пер., 10