

УДК 533.6.011.32

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ОБТЕКАНИЯ НА ДИНАМИКУ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.А. Сергеева, Р.В. Сидельников

В настоящей работе проводится оценка адекватности трех наиболее часто используемых в расчетах моделей турбулентности ($k-\varepsilon$, $k-\omega$ и $k-\omega SST$) при нестационарном поперечном обтекании цилиндра. Данная оценка осуществляется с двух позиций. Во-первых, с точки зрения их влияния на соотношение силовых характеристик (коэффициентов боковой силы и силы сопротивления). Во-вторых, с точки зрения влияния на частоту срыва вихрей, характеризующую числом Струхала. Кроме того, рассмотрены некоторые аспекты, определяющие взаимосвязь ветровой нагрузки с боковой силой и силой сопротивления. Получены предварительные результаты в виде графика зависимости указанного соотношения от упомянутого числа Струхала.

Ключевые слова: боковая сила; ветровая нагрузка; поперечные (изгибные) колебания.

Поперечное обтекание кругового цилиндра (цилиндрических конструкций) при умеренных числах Рейнольдса ведет к формированию за телом вихревой дорожки, именуемой дорожкой Кармана. Попеременное образование вихрей на противоположных сторонах влечет за собой возникновение колебаний в поперечном направлении (перпендикулярно направлению ветра).

Процесс образования вихрей на боковых по ветру поверхностях цилиндрических конструкций зависит от чисел Рейнольдса Re . Хорошо известно соотношение между упомянутым Re для потока, порождающего след, и числом Струхала Sh для генерации вихрей, полученное, в основном, из экспериментов (рис. 1).

При числах Рейнольдса, не превышающих 200 (т.е. достаточно небольших значениях Re), течение в непосредственной близости к поверхности цилиндра будет мало отличаться от идеального течения (на рис. 1 соответствует I, или «ламинарному», режиму [2]). Диапазон от $Re = 200$ до 300 является переходным (на рис. 1 соответствует III режиму [2]). В нем меняется характер течения, от ламинарного к турбулентному, в области свободных вихрей, сорвавшихся с поверхности цилиндрической конструкции. Вихревой след в данном случае периодичен, однако скорость вблизи поверхности меняется не периодически из-за турбулентности течения. Аперiodичность изменения скорости аргументируется турбулентностью природного ветра, результатом чего является случайный характер амплитуд подъемной или боковой силы. Эта случайность становится более выраженной с

увеличением числа Рейнольдса, что объясняется смещением точка отрыва вихрей назад по потоку при больших Re . В результате резко падает коэффициент лобового сопротивления, и след становится более узким (и аperiodичным).

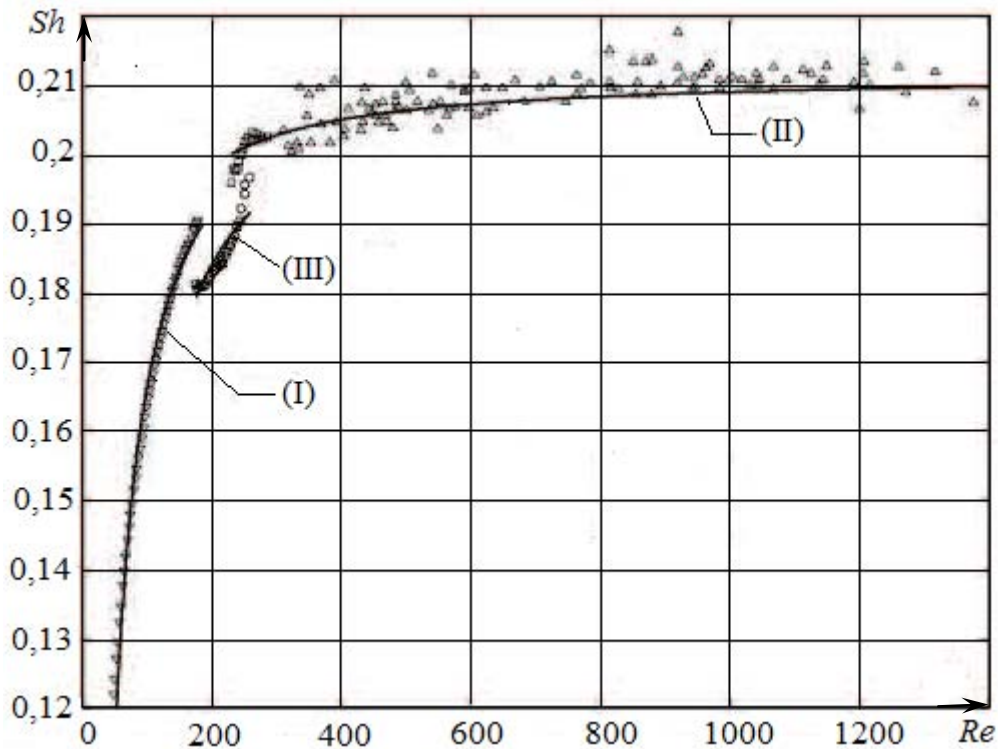


Рис. 1. Эмпирическое соотношение чисел Струхали-Рейнольдса для потока за цилиндром, полученное Х. Арефом

В одной из предыдущих работ [1] был выявлен факт того, что величина боковой силы чувствительна к значению числа Рейнольдса. Кроме того, в [1] было установлено, что в критическом диапазоне чисел Рейнольдса находится максимальное значение соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления C_{lp}/C_d (а именно – 2,8).

Однако, помимо влияния Re на соотношение силовых характеристик, определенный интерес также представляет зависимость указанного соотношения от числа Струхали.

$$Sh = \frac{nd}{V},$$

где n – частота отделения вихрей, d – характерный размер, V – скорость ветра. Когда сход вихрей является периодическим n – частота этого схода; если же сход является случайным, необходимо говорить об энергетическом спектре, а не об одной частоте.

При расчетах аэродинамических характеристик ракет довольно часто можно встретить решение задачи поперечного обтекания цилиндра, например, для определения боковой силы. Такая задача представляет собой аналогию между нормальной к оси вращения компонентой течения и двумерным потоком около цилиндра с осью, нормальной к плоскости обтекания. В данном случае предполагается эквивалентность характеристик набегающего потока и поперечного потока вокруг тела, расположенного под углом атаки [5].

При свободном старте с открытой наземной пусковой установки на ракету действуют возмущающие силы и моменты, обусловленные, в частности боковым ветром. Здесь, при решении задачи бокового обтекания ракеты на старте, целесообразным является применение как раз упомянутой ранее аналогии. Однако это лишь один из частных случаев, который не является единственным. Помимо него, также имеет место задача движения на конечном участке траектории с учетом периодического изменения угла атаки. В продолжение исследования вопросов влияния нестационарности процессов на аэродинамику и динамику полета летательных аппаратов и будет рассмотрено ее решение. Поэтому для дальнейшего рассмотрения данных аспектов, нам потребуется разрешение вопросов, поднятых в данной статье.

Настоящая работа рассматривает задачу поперечного обтекания цилиндра с получением картины периодического отрывного течения (вихревой дорожки Кармана) в контексте исследования влияния определяющих параметров задачи, таких как числа Рейнольдса, Струхалея, на соотношение боковой силы и силы сопротивления. Целью данного исследования является дальнейшая разработка методики по оценке влияния упомянутых Re и Sh на возникновение, величину и периодичность боковых сил.

Любые исследования имеет смысл проводить лишь в условиях равнозначности используемой численной модели по отношению к экспериментальной (эмпирической). Соответственно, это справедливо и для исследования влияния любых факторов нестационарного обтекания на аэродинамику и динамику полета летательного аппарата, а также влияния на конструкцию ветровых воздействий (в т.ч. в вероятностной постановке). С учетом того, что выбор модели турбулентности оказывает существенное влияние на корректность получаемых в ходе моделирования результатов логично возникает задача оценки адекватности применяемых в расчетах моделей образования вихрей.

Для рассматриваемого нами случая двумерного обтекания цилиндра мы будем рассматривать данный вопрос с двух позиций: 1) оценим влияние модели турбулентности на соотношение силовых характеристик C_{lp}/C_d ; 2) оценим ее влияние на частоту срыва вихрей, безразмерной характеристикой которой является число Струхалея Sh . Полученные результаты мы используем для установления зависимости между Sh и соотношением C_{lp}/C_d .

Поперечное обтекание цилиндра производилось потоком воздуха с постоянными свойствами, принятыми при 15 °С (288,16 К), в дозвуковом диапазоне чисел Маха[1]. Так как угловая составляющая незначительная, то имеют место небольшие дозвуковые скорости обтекания. Именно при таких скоростях имеют место значительные боковые силы. Помимо этого, на выбор конкретных значений скоростей повлиял заданный диапазон чисел Рейнольдса Re (700...1400). Данный диапазон (относится ко II-му режиму), как видно на рисунке 1, соответствует относительно постоянным значениям чисел Струхала Sh , чем и обосновывается его использование в данной работе.

Геометрическая модель представляет собой прямоугольную область, указанную на рисунке 2, с размерами: 30 диаметров обтекаемого тела по длине и 17 диаметров по ширине области.

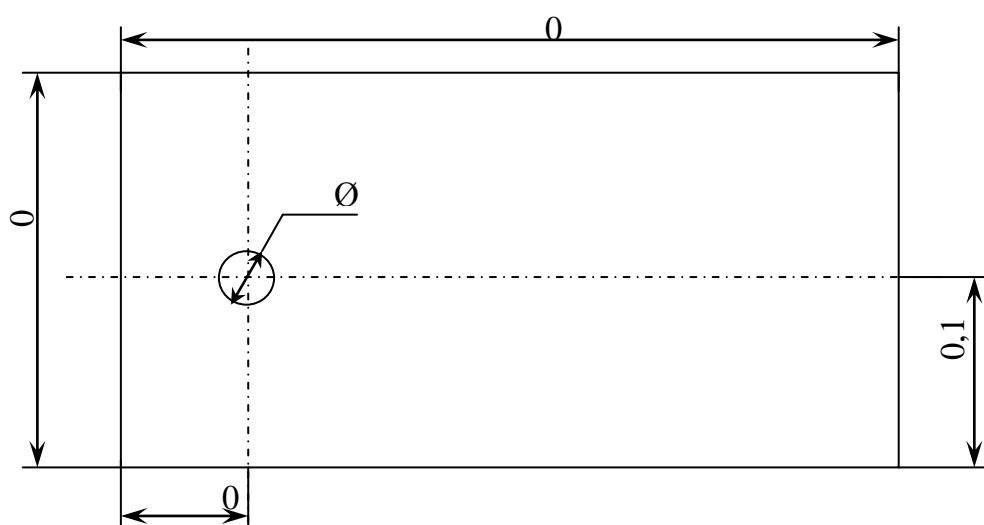


Рис. 2. Геометрические характеристики расчетной области, м

Создание геометрической и сеточной модели осуществлялось посредством сеточного генератора *ICEM CFD*. В настоящем расчете использовалась структурированная блочная сетка с четырехугольной ячейкой, что обуславливалось возможностью получения как можно более точных результатов, а также меньшей продолжительностью расчета и необходимого объема оперативной памяти компьютера.

Моделирование поставленной выше задачи, включающее в себя определение начальных и граничных условий, выбор уравнений, которые будут описывать исследуемый процесс, а также методы их решения производилось в программном блоке *ANSYS Fluent*.

При оценке адекватности трех наиболее часто используемых в расчетах моделей турбулентности было выявлено, что результаты, наиболее близкие к эмпирическим (экспериментальным), дают стандартные модели $k-\omega$ и $k-\varepsilon$, основанные лишь на двух уравнениях (рис. 3). При этом использование более сложной модели вихреобразования $k-\omega$ *SST* лишь позволяет

получить более четкую картину обтекания бесконечно длинного цилиндра (зарождение и отрыв вихрей и т.д.). Таким образом, целесообразно при проведении дальнейших исследований применять k - ε модель образования вихрей в связи с изложенными выше причинами.

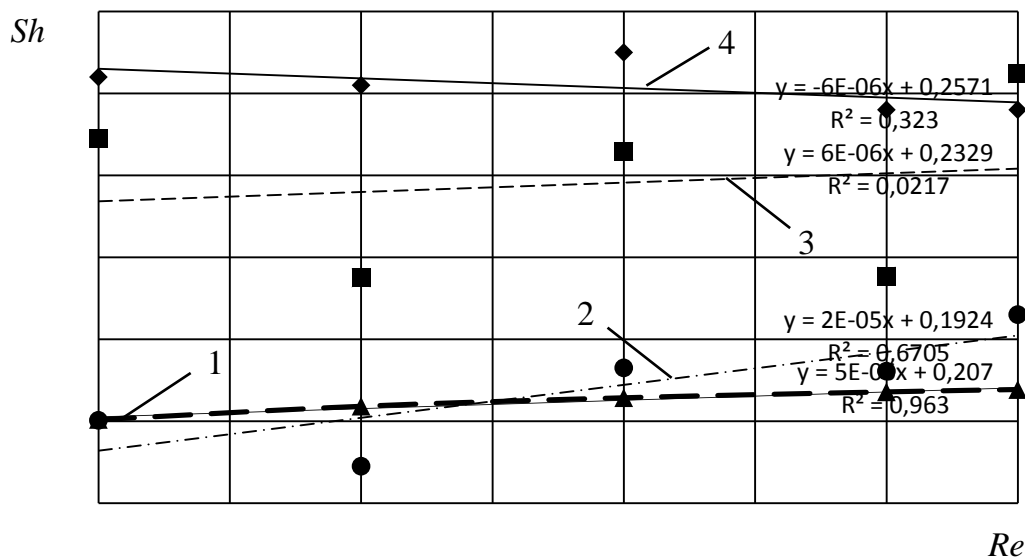


Рис. 3. Зависимость значений числа Струхали Sh от числа Рейнольдса Re (линейная аппроксимация): 1 – эмпирическое соотношение Re - Sh по Х. Арефу; 2 – для модели турбулентности k - ε ; 3 – для модели турбулентности k - ω ; 4 – для модели турбулентности k - ω SST

Получив определенное представление об адекватности k - ω , k - ε и k - ω SST, мы сделали шаг в сторону установления зависимости между числом Струхали и соотношением силовых характеристик C_{lp}/C_d .

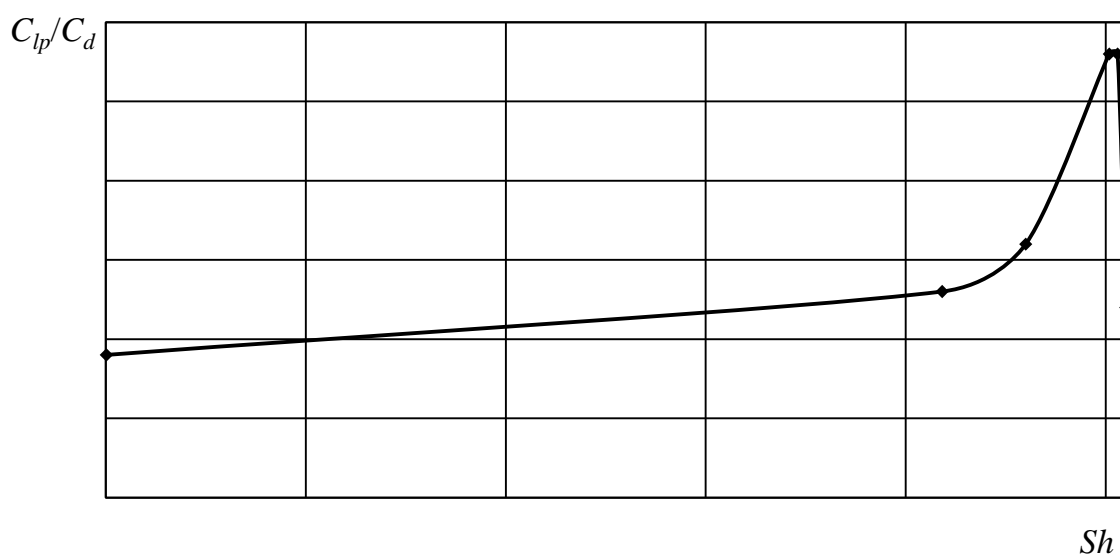


Рис.4. Зависимость значений соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления от числа Струхали

Представленные результаты (рис. 4) отражают наличие некоторой взаимосвязи между характеризуемой числом Струхала частотой срыва вихрей и величиной упомянутого соотношения силовых характеристик C_{lp}/C_d . Характер этой зависимости говорит о том, что даже незначительные изменения частоты срыва вихрей могут повлечь за собой резкое увеличение боковой силы по отношению к силе сопротивления. Таким образом, существующая взаимосвязь показывает именно влияние частоты срыва вихрей на наличие и интенсивность колебаний цилиндра (цилиндрических конструкций) в поперечном (по отношению к набегающему потоку) направлении в плоскости обтекания. Это объясняется возникновением аэродинамических поперечных сил, вызванных как раз периодическим срывом вихрей.

Раскачивание высотных сооружений, конструкций обусловлено образованием вихревой дорожки. Особенно опасным является [резонансное](#) раскачивание, при котором частота образования вихрей совпадает или близка к собственной частоте горизонтальных колебаний конструкции, что нередко приводит к ее повреждению, деформации или же разрушению.

Так, полученные данные позволяют оценить степень влияния возмущающих факторов на поведение конструкции при резонансных изгибных колебаниях. Иными словами, позволяют определить, в каком случае (при каких внешних воздействиях) произойдет совпадение частоты собственных колебаний конструкции с частотой срыва вихрей.

Зависимости, которые были получены в результате настоящего исследования, станут в некотором роде базой для решения задачи бокового обтекания ракеты на старте. Поэтому следующим шагом проводимого исследования предполагается разрешение вопросов задачи старта с точки зрения возникновения изгибных колебаний конструкции при внешних ветровых воздействиях.

Библиографический список

1. Сергеева, А.А. Исследование влияния нестационарного поперечного обтекания цилиндра на возникновение боковых сил / А.А. Сергеева, Р.В. Сидельников // Сб. статей 66-й научной конференции профессорско-преподавательского состава. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 112–116.
2. Ареф, Х. Вихревая динамика волновых следов / Х. Ареф // Нелинейная динамика. – 2006. – № 4. – С. 411–424.
3. Савицкий, Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г.А. Савицкий. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 111 с.
4. Лебедев, А.А. Баллистика ракет / А.А. Лебедев, Н.Ф. Герасюта. – М.: Машиностроение, 1970. – 244 с..
5. Хемш, М. Аэродинамика ракет: в 2-х книгах. Кн. 1. / М. Хемш, Дж. Нилсен; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 426 с.

[К содержанию](#)