

Ветровые нагрузки на сооружения

Пискун А.А.

Белорусский национальный технический университет

Введение

Действие ветра на сооружения проявляется в виде статической ветровой нагрузки и в возбуждении колебаний конструкций. Недостаточность знаний о действии ветра на сооружения приводила к обрушению мостов, высоких зданий, опор линии электропередачи, радиомачт. Основными причинами аварий были ошибки в назначении величины расчетной ветровой нагрузки, неправильное представление о характере ее распределения по сооружению, недостаточный учет аэродинамических характеристик, вибрация конструкций. Если известны расчетная скорость ветра, его порывистость, профиль ветра по высоте, вероятность ветров различной силы и «роза ветров», может быть установлено действие ветра на сооружение.

Ветер — динамическая нагрузка, так как скорость его все время меняется. Реакция сооружения на ветер будет различной: жесткие конструкции воспринимают ее как статическую, реакция гибких конструкций зависит от частоты свободных (собственных) колебаний. Влияние порывов ветра часто оценивают динамическим коэффициентом, учитывающим и повторное их действие.

Для высоких сооружений ветровая нагрузка является основной; при расчете их на прочность и деформативность необходимы более детальные сведения о ветре в месте предполагаемого строительства, чем сообщаемые в нормативных документах.

Карта районирования территории страны по интенсивности ветровой нагрузки, приведенная в книге, составлена для равнинных районов. Местные особенности рельефа географического пункта не показаны на ней из-за недостаточной частоты расположения метеорологических станций и малого масштаба карт. Поэтому большое значение приобретают общие сведения о влиянии на величину скорости ветра долины, холма, горной системы большой водной по-

верхности, городской застройки с высокими зданиями, лесных массивов и др.

Оценка расчетной скорости ветра и анализ влияния его порывов на сооружение вследствие случайного характера явления не могут быть сделаны без привлечения математической статистики.

Ветровая нагрузка на сооружения зависит не только от размеров сооружения и скорости ветра, но и от конструктивной формы, оцениваемой аэродинамическими коэффициентами. Только ясное физическое представление о действии ветра на сооружения, для познания которого привлечены и смежные научные дисциплины, в частности прикладная климатология, аэромеханика, математическая статистика, теория колебаний, может быть гарантией правильного расчета сооружений.

Общие сведения о ветре

Строитель рассматривает ветер как кратковременную нагрузку и источник вибрации конструкций. Для высоких сооружений и зданий, большепролетных конструкций, мостов и др. ясное представление о структуре ветра, законах распространения, интенсивности его, частоте сильных ветров, порывистости является обязательным условием проектирования, поскольку действие ветра определяет прочность и стоимость конструкции

Движение масс воздуха относительно земной поверхности происходит под воздействием разности атмосферного давления, определяемого барическим градиентом, силой трения, отклоняющей силой вращения земли и центробежной силой. Сила трения заметно сказывается в нижних сотнях метров. Барический градиент (бар— единица давления, принятая в метеорологии), являющийся разностью давления обычно на один градус меридиана, выражается в миллибарах $A000 \text{ мбар} = 750 \text{ мм рт. ст.}$

Вследствие турбулентности воздушного потока скорость и направление в той или иной мере колеблются. Величину скорости как осредненную величину определяют с помощью стационарных приборов (флюгера, анемометра и др.), а в свободной атмосфере на больших высотах — с помощью радиозондов, шаропилотных наблюдений и аэростатов. Скорость ветра измеряется в м/сек, иногда оценивается узлами или баллами международной шкалы. Узел— 1

морская миля в час (около 0,5 м/сек). Направление ветра указывают по 8 или 16 румбам горизонта или по азимутальным углам, считая за 0 направление на север; углы отсчитывают по часовой стрелке. Особое значение для общей циркуляции атмосферы имеют возникающие области низкого и высокого атмосферного давлений, называемые циклонами и антициклонами. Они часто наблюдаются в средних широтах и вызывают сильные воздушные течения.

Трение частиц воздуха о поверхность земли отклоняет направление ветра от прямолинейного так, что слева по движению остается более низкое давление атмосферы. С ростом высоты над поверхностью земли влияние силы трения уменьшается, что приводит к повышению скорости ветра. На большой высоте, где влияние трения о поверхность земли исчезает, а движение установившееся и равномерное, ветер дует по изобаре. В метеорологии его называют градиентным. Изобары циклонов и антициклонов не прямые, а замкнутые линии вида эллипсов и окружностей; по ним происходит движение воздушных масс, вследствие чего возникает еще центробежная сила. Для вихря, вращающегося против часовой стрелки, если в центре его пониженное давление, т. е. циклон, радиус действия которого достигает 3000 км, характерны большая порывистость и сильные осадки.

Наиболее разрушительны по своей силе тропические циклоны, иногда движущиеся со скоростью более 50 м/сек. В зоне Карибского моря такие ураганы причиняют колоссальные разрушения и уносят сотни, а иногда и тысячи человеческих жизней. В Восточной Азии их называют тайфунами. Они обрушиваются на наш Дальний Восток, наиболее сильно страдают от них Курильские острова. Вихри над морем называют смерчами, над сушей — тромбами. По визуальным наблюдениям скорость ветра достигает 100 м/сек. Предвестником смерча является длительная жаркая погода и влажность воздуха. Вследствие низкого давления/воздуха внутри вихря и огромной скорости вращения смерч всасывает в себя воду и предметы, встречающиеся на его пути. Летом 1904 г. над Москвой пронесся тромб, почти полностью уничтоживший Анненгофскую рощу, разрушивший массу зданий в Лефортове, в окрестностях Москвы и близлежащих селах. Скорость ветра достигала 60 м/сек.

Движение воздуха в атмосфере турбулентное. С турбулентностью атмосферы связана порывистость ветра. При значительных

кратковременных отклонениях от средних величин скорости говорят о шквалистости ветра. Порывистость ветра в исследованиях характеризуют с помощью средних квадратов пульсации составляющих скорости ветра и стандартных отклонений. Восходящие и нисходящие токи воздуха могут вызвать вихрь с горизонтальной осью — шквал: ветер как бы скачком повышается от слабого до ураганного, достигая 30 м/сек и даже больше. В Москве шквал в мае 1937 г. причинил огромные разрушения, хотя продолжался всего 3—4 мин. Сильные шквалы наблюдаются при жаркой сухой погоде, длившейся в течение многих дней.

Ветровая нагрузка на сооружения

Ветровая нагрузка на сооружения стала привлекать внимание строителей еще в прошлом столетии в связи с появлением стальных конструкций мостов больших пролетов, а применение мачт и башен высотой до 600 м заставило обратить внимание на профиль ветра по высоте. За последнее время интерес к ветровой нагрузке появился у авторов проектов высотных зданий¹, строителей заводов с оборудованием, расположенным на открытом воздухе. Ветровая нагрузка стала доминирующей для линий электропередачи напряжением 220 кВ и более.

Появление сооружений, деформативность которых во многом определяет нормальное протекание технологического процесса, заставило по-иному взглянуть на ветровую нагрузку, не ограничивая ее ролью участника только в прочностных расчетах. Все более широкое внедрение теории вероятностей и математической статистики в практику проектирования строительных конструкций потребовало сведений о вероятности ветров различной силы. Более того, расчет строительных конструкций на ветровую нагрузку стал неотделим от технологических вопросов, когда рассматривается общая надежность системы или выясняется ее оптимальное решение.

Совершенствование методики расчета сооружений, внедрение высокопрочных материалов привело к повышению гибкости конструкций и облегчению их веса, заставило отказаться от взгляда на ветровую нагрузку только как на статическую. Вопросы порывистости ветра важны при проектировании гибких сооружений, динамическое действие ветра на которые вызывает иную реакцию, чем

на жесткие или массивные конструкции. Для сооружений, характерных большими периодами свободных колебаний, особенно у таких, ветровая нагрузка на которые определяет их прочность, нельзя ограничиваться учетом порывистого характера ветра только введением динамического коэффициента в статический расчет.

Ранее порывы ветра рассматривали в виде упругого удара на сооружение и учитывали это динамическим коэффициентом в расчете. При таком подходе оставался открытым вопрос о влиянии повторных порывов ветра, что привело к введению еще коэффициента повторяемости.

Ветровая нагрузка на сооружение зависит от скорости и порывистости ветра, параметров конструкции, включая ее динамические характеристики, аэродинамических коэффициентов формы, размеров и положения конструкции относительно потока. Аэродинамические коэффициенты определяют опытным путем

Ветровая нагрузка на сооружение может быть определена по формуле

$$Q = n \sum c_x \beta q S,$$

где n — коэффициент перегрузки, вводимый при расчете сооружений по предельным состояниям;

c_x — аэродинамический коэффициент— коэффициент лобового сопротивления;

q — нормативный скоростной напор ветра на уровне середины рассматриваемого участка сооружения;

β — коэффициент, называемый динамическим, учитывающий реакцию сооружения на действие порывов ветра;

S — проекция площади сооружения на плоскость, нормальную к направлению ветра.

Здесь скоростной напор ветра

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \text{кг/м}^2,$$

где ρ — плотность воздуха, зависящая от давления, температуры и влажности;

V — скорость ветра в м/сек.

На больших высотах, в условиях Крайнего Севера температура воздуха может быть ниже нормальной, принимаемой в стандартной

атмосфере равной 15°C , что вызывает повышение расчетного скоростного напора ветра и что иногда учитывают в расчетах.

При неизменной температуре воздуха давление атмосферы с высотой понижается. Это приводит к снижению скоростного напора ветра вследствие уменьшения плотности воздуха. Чаще всего температура воздуха с высотой снижается, что, учитывая понижение атмосферного давления с высотой, позволяет оперировать с постоянным значением плотности воздуха, равным $0,125\text{ кг-сек}^2/\text{м}^3$. Тогда скоростной напор ветра

$$q = V^2/16 \text{ кг/м}^2.$$

Формула показывает, что ветровую нагрузку на сооружение сначала необходимо определить приближенно, затем назначить размеры конструкции, после чего выяснить ее динамические параметры и, наконец, откорректировать величину динамического коэффициента, зависящего от периода свободных колебаний и логарифмического декремента затухания.

Сама природа ветра, когда на среднюю скорость накладываются порывы ветра, подсказывает представления ветровой нагрузки в виде двух компонент, одна из которых статическая, а другая — динамическая:

$$q_p = n(q_0 + q_d),$$

где n — коэффициент перегрузки, учитывающий возможное повышение нормативного скоростного напора q_0 . Он определяется из вероятности появления скорости ветра за больший промежуток времени, чем принятый при определении нормативной величины скоростного напора.

Если в формулу ввести m — коэффициент пульсации скоростного напора, т. е. динамической добавки, определяемой статистическим путем (см. выше), g — коэффициент динамичности, учитывающий реакцию сооружения на пульсацию ветра, тогда расчетный скоростной напор ветра

$$q_p = nq_0(1 + \xi m)$$

$$\text{или } q_p = n\beta q_0,$$

$$\beta = 1 + \xi m$$

коэффициент, учитывающий динамический характер воздействия порывов ветра.

Действие порывов ветра на сооружение зависит от периода свободных колебаний и, что не менее важно, от затухания, характеризуемого чаще всего логарифмическим декрементом b . Последний зависит от вида основного материала и конструктивного решения. Декремент затухания, определяемый опытным путем, принимают по данным о поведении подобных конструкций.

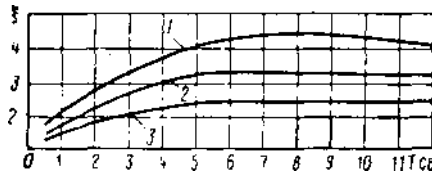


Рис. 1 Коэффициент динамичности в зависимости от периода свободных колебаний сооружений

1 — для гибких стальных сооружений ($b \ll 0,1$); 2 — для металлических и деревянных сооружений ($b \ll 0,15$); 3 — для железобетонных и каменных сооружений ($b \gg 0,3$)

Динамические коэффициенты могут быть представлены в виде семейства кривых в функции периода свободных колебаний сооружения. На рис. 1 приведены графики для трех характерных групп: гибких стальных конструкций, металлических, деревянных и железобетонных и каменных, что следует из рекомендаций С-НиП. Эти графики являются осредненными для всех семи районов по интенсивности ветровой нагрузки.

Влияние порывов ветра на сооружение становится пренебрежимо малым, если период его свободных колебаний меньше 0,25 сек.

Период свободных колебаний сооружения определяют обычным путем, после чего по рис. 1 находят коэффициент для рассматриваемого вида конструкций, а затем по формуле — коэффициент W .

Для гибких сооружений, большепролетных мостов и др., характеризующихся значительно большим влиянием высших форм свободных колебаний, нельзя ограничиться учетом только основного тона. Например, вертикальные консольные стержни большой гибкости, что характерно для телевизионных башен, различных выста-

вочных конструкций, монументов, оказываются перегруженными, если в их расчетах не были учтены вторая и третья формы свободных колебаний. В мачтах с оттяжками иногда учитывают и четвертую гармонику (проект СНиП).

Аэродинамические коэффициенты, связывающие сопротивление конструкций ветру и наветренную площадь, определяют по справочным материалам, основанным на исследовании моделей и, реже, натуры. Величина ветровой нагрузки зависит от абсолютных размеров сооружения, потому что среднее удельное давление на большое по площади тело, например щит, меньше, чем на подобное по форме тело, но меньших размеров.

Суммарная ветровая нагрузка на горизонтальные провода, канаты, а также на большой длины сооружения, по данным натурных наблюдений, оказывается меньше, чем следовало бы из рассмотрения постоянной по пролету наибольшей расчетной скорости ветра. Это учитывают понижающими коэффициентами при расчете проводов линий электропередачи и других конструкций.

Коэффициент перегрузки, вводимый в расчет прочности, зависит от назначения сооружения, планируемого срока службы и роли ветра в общем комплексе нагрузок. Для высоких сооружений и других, преобладающее значение ветровой нагрузки для которых, очевидно, коэффициент перегрузки принимают 1,3, т. е. выше, что и учтено СНиП.

Для проектирования радиомачт и телевизионных опор, опор линий передачи электрической энергии, конструкций подъемных кранов издают свои правила. Ветровую нагрузку на железнодорожные, автодорожные и городские мосты, канатные дороги, кабель-краны, перегружатели часто выделяют в отдельные нормативные документы, базирующиеся на основных нормах- стандартах.

При проектировании уникальных сооружений, большепролетных мостов, выставочных павильонов, часто самой разнообразной формы, требуется более тщательное рассмотрение ветровой нагрузки, в котором наряду с рациональным назначением величины скоростного напора ветра большое внимание уделяют аэродинамическому комплексу вопросов. Часто без исследований моделей сооружения в аэродинамической трубе нельзя обойтись. Это, например, стало обязательным при проектировании, всяческих мостов, радиотелескопов, радиомачт большой высоты.

Заключение

Учёт ветровой нагрузки на сооружения является очень важным фактором, который стоит учитывать на всех стадиях проектирования и строительства зданий и сооружений.

Список литературы

Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий, Москва, 1972г.

СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования.