

УДК 621.396

## Совершенствование методов расчета и диагностики металлических мачт сотовой связи

Губанов В.В., к.т.н., Межинская И.В.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

**Аннотация.** В статье приведены результаты натурных обследований мачт сотовой связи на основе специальной методики. Выполнен анализ и классификация дефектов мачт, допущенных на стадиях проектирования, изготовления, возведения, эксплуатации, и повреждений, приобретенных на протяжении эксплуатации. Рассмотрена методика расчета предварительных напряжений оттяжек. Определены направления ветра и сочетания нагрузок, которые являются критическим из условия жесткости ствола, прочности оттяжек и определяют требуемую величину предварительного натяжения оттяжек. Выполнено исследование свойств ветрового потока над поверхностью опорного здания в результате проведения лабораторного эксперимента в аэродинамической трубе. Получены безразмерные коэффициенты увеличения скорости ветра при обтекании здания ветровым потоком. Предложен способ совершенствования методики расчета ветрового давления на мачты сотовой связи, расположенные на крышах зданий, с учетом изменения свойств потока.

**Анотація.** В статті наведено результати натурних обстежень щогл стільникового зв'язку на основі спеціальної методики. Виконаний аналіз і класифікація дефектів щогл, допущених на стадіях проектування, виготовлення, зведення, експлуатації, і пошкоджень, отриманих упродовж експлуатації. Розглянута методика розрахунку попередньої напруги відтяжок. Визначені напрями вітру і поєднання навантажень, які є критичними з умови жорсткості стовбура, міцності відтяжок і визначають необхідну величину попереднього натягнення відтяжок. Виконано дослідження властивостей вітрового потоку над поверхнею опорної будівлі в результаті проведення лабораторного експерименту в аеродинамічній трубі. Отримані безрозмірні коефіцієнти збільшення швидкості вітру при обтіканні будівлі вітровим потоком. Запропонований спосіб вдосконалення методики розрахунку вітрового тиску на щогли стільникового зв'язку, розташовані на дахах будівель, з врахуванням зміни властивостей потоку.

**Abstract.** The results of field inspections of cellular communication guyed masts, which made on the basis of a special technique, are given in the paper. It is analysed and classification of defects of guyed masts allowed at design stages, manufacturing, construction, operation, and the damages acquired throughout operation. The guys preliminary tension design procedure is considered. The directions of a wind and a combination of loadings which are critical of a condition of rigidity of a trunk, durabilities of delays are defined and define the demanded size of a preliminary tension of guys. Research of wind stream properties over a surface of a basic building as a result of carrying out laboratory experiment in a wind tunnel is executed. Dimensionless factors of increase in speed of a wind are received at a building flow by a wind stream. The way of improvement of a design procedure of wind pressure upon the guyed masts of cellular communication located on roofs of buildings, taking into account change of properties of a stream is offered.

**Ключевые слова:** мачта сотовой связи, проектирование, изготовление, возведение, эксплуатация, аэродинамическая труба.

**Особенности мачт сотовой связи.** Впервые сотовая связь появилась на территории Украины в 1991 году. В соответствии с технологической спецификой передачи сигналов для нормальной работы сотовой связи необходимо образование узкой сети антенных устройств, расположенных на высоте до 80 м над поверхностью земли. В качестве опор антенных устройств сотовой связи широко применяются металлические решетчатые мачты на оттяжках. Данные сооружения являются относительно новым типом высотных сооружений, имеющим ряд отличительных особенностей по сравнению с крупногабаритными мачтами теле- и радиосвязи [1, 2, 3].

Мачты имеют следующие преимущества по сравнению с сооружениями башенного типа:

- меньшую массу ствола вследствие поддерживающего бокового влияния оттяжек;
- равные поперечные сечения по высоте ствола;
- база ствола шарнирно закреплена с основанием, при этом не требуется возведение массивного центрального фундамента.

Особенности и малые габариты мачт сотовой связи позволяют располагать их на крышах существующих зданий. Это дает возможность:

- экономить городскую территорию;
- уменьшить высоту конструкций опор.

В силу своих размеров мачты сотовой связи передают на конструкции нижерасположенных зданий нагрузки небольших масштабов, которые при проектировании изначально не были рассчитаны на восприятие дополнительных нагрузок. Положительным фактором при выборе площадки строительства является наличие нескольких анкерных фундаментов оттяжек мачт, что позволяет равномерно распределять усилия на несущие конструкции нижестоящих зданий. Более того, при шарнирном закреплении ствола мачты с центральным фундаментом в основании отсутствуют изгибающие моменты, следовательно, центральный фундамент не требует массивных размеров. Так, при расположении мачт на крышах существующих построек возникают новые специфические конструктивные решения фундаментов.

Важным параметром, определяющим воздействие на здание, является предварительное натяжение в оттяжках, так как оно представляет собой постоянную нагрузку на мачту и соответственно на здание на протяжении всего периода эксплуатации мачты. При проектировании мачт необходимо учитывать недопустимость превышения нагрузок на существующие здания.

Отличительные особенности расположения мачт на кровле зданий порождают специальные требования к расчету ветровой нагрузки с учетом собственных аэродинамических свойств существующего здания.

**Результаты натурных обследований и анализа опыта эксплуатации мачт.** На основании проведения натурных обследований, изучения проектной документации мачт, анализа и систематизации опыта эксплуатации мачт выполнено описание применяемых на практике конструктивных решений мачт сотовой связи в целом и их отдельных элементов [4]. Анализ видов конструктивных решений показывает, что существует большое разнообразие вариантов проектирования. Разработка унифицированных проектов мачт при условии устранения выявленных недостатков позволит уменьшить стоимость изготовления и строительства, а также сократить расходы на стадии эксплуатации конструкций.

Натурные обследования мачт выполнялись в соответствии со специальной структурированной методикой [4], которая основана на существующих методиках обследования решетчатых конструкций: башен, опор линий электропередачи, больших переходов воздушных линий электропередачи, шахтных копров и антенных сооружений, но в то же время учитывает специфические особенности мачт сотовой связи.

Дефекты мачт сотовой связи можно разделить на четыре группы:

а) Допущенные на стадии проектирования:

- оси элементов ствола не центрированы в узлах пересечения, эксцентриситеты составляют 4–12 см;
- элементы решетки соединяются с поясами встык;
- длина сварного шва решетки меньше минимально допустимой 35 мм;
- отсутствие дополнительных раскосов в приопорных зонах ствола;
- отсутствие диафрагм в местах крепления оттяжек;
- отсутствие проушин лацменных узлов;
- отсутствие горизонтальных ребер жесткости проушин;
- применение для проушин лацменных узлов съемных соединений;
- отсутствие указаний относительно предварительных натяжений оттяжек в проектной документации;
- равные величины предварительных напряжений для всех уровней оттяжек по высоте ствола;
- применение неоцинкованных канатов;
- применение канатов с органическим сердечником;
- применение в качестве материала оттяжек круглой стали;
- открытое закрепление нижнего конца оттяжки;

- применение натяжного устройства с недостаточной длиной резьбы;
- отсутствие анкерного фундамента, соединение натяжного устройства непосредственно с близрасположенной конструкцией;
- передача усилия от оттяжки не перпендикулярно к оси симметрии анкерного фундамента.

б) Допущенные на стадии изготовления:

- отклонение оси ствола от вертикального положения (при отсутствии горизонтальной нагрузки);
- закручивание секций ствола относительно друг друга;
- низкое качество сварных соединений: наплывы, непровары в корне шва, отдельные шлаковые включения, поры;
- некачественное изготовление фланцев: зазор между фланцами, смещение фланцев относительно друг друга в пакете;
- устройство соединения ствола с фундаментом путем приварки фланцев к фундаментной плите.

в) Допущенные на стадии монтажа:

- применение профилей элементов, не соответствующих проектным решениям;
- соединение фланцев с помощью сварки;
- прокладка между фланцами металлических пластин;
- неправильная ориентация секций по вертикали, в результате чего появляются эксцентриситеты крепления оттяжек относительно точки пересечения осей элементов ствола;
- неравномерное предварительное натяжения оттяжек одного яруса при разнице в величинах натяжений более 160 %;
- отсутствие предварительного натяжения в оттяжках;
- отклонение осей оттяжек от проектного положения в горизонтальной плоскости;
- отклонение осей оттяжек от проектного положения в вертикальной плоскости;
- неверное расположение зажимов на оттяжках.

На стадии эксплуатации:

- устройство отверстий в поясах ствола с целью отведения влаги при отсутствии заглушек;
- расположение на сооружении большего количества технологического оборудования (антенн, радиомодулей, фидеров и т.д.), чем это предусмотрено в проекте.

Повреждения мачт сотовой связи делятся на:

а) механические повреждения:

- искривления, погнутости элементов;
- трещины в поясах у основания ствола;

б) коррозионный износ:

- нарушение лакокрасочного покрытия (светодневной маркировки);
- нарушение коррозионной защиты и коррозионный износ конструкций мачт.

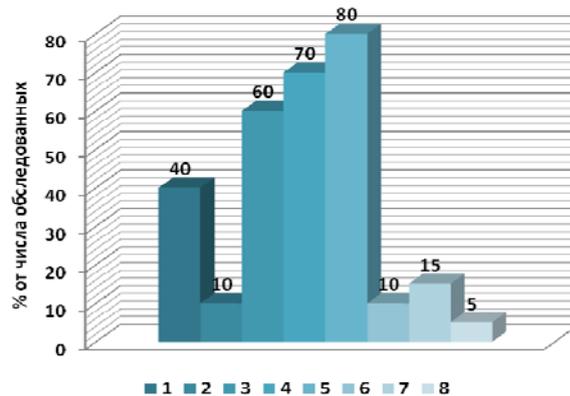


Рис. 1. Дефекты стволов мачт, допущенные на стадии проектирования:  
1 – оси элементов ствола не центрированы в узлах пересечения;  
2 – элементы решетки соединяются с поясами встык; 3 – длина сварного шва решетки меньше минимально допустимой; 4 – отсутствие дополнительных раскосов в приопорных зонах ствола; 5 – отсутствие диафрагм в местах крепления оттяжек; 6 – отсутствие проушин лацменных узлов;  
7 – отсутствие горизонтальных ребер жесткости проушин;  
8 – применение для проушин лацменных узлов съемных соединений

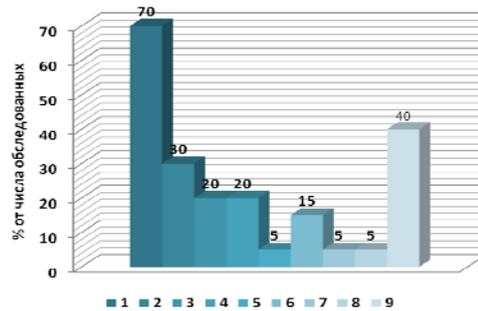


Рис. 2. Дефекты оттяжек и анкерных фундаментов мачт, допущенные на стадии проектирования:

- 1 – отсутствие указаний о предварительных натяжениях оттяжек в проектной документации; 2 – равные величины предварительных напряжений для всех уровней оттяжек; 3 – применение неоцинкованных канатов; 4 – применение канатов с органическим сердечником; 5 – применение в качестве материала оттяжек круглой стали; 6 – открытое закрепление нижнего конца оттяжки; 7 – применение натяжного устройства с недостаточной длиной резьбы; 8 – отсутствие анкерного фундамента, соединение натяжного устройства непосредственно с близрасположенной конструкцией; 9 – передача усилия от оттяжки под углом, отличным от 90°, к оси симметрии анкерного фундамента

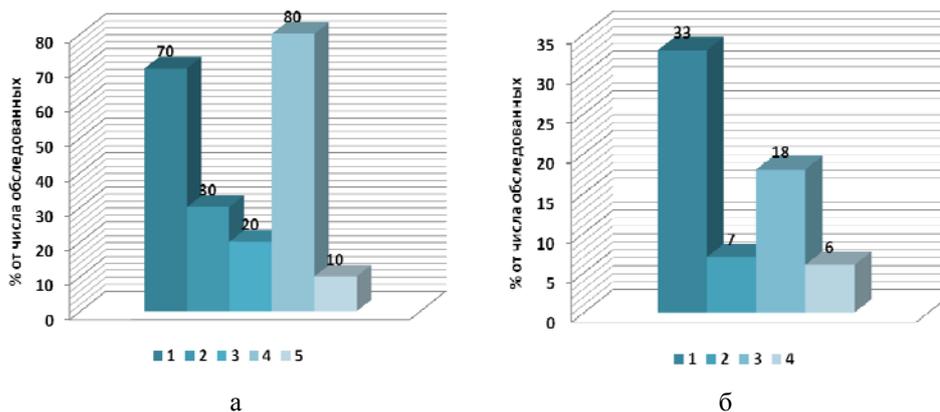


Рис. 3. Дефекты и повреждения мачт:

а – дефекты, допущенные на стадии изготовления:

- 1 – отклонение оси ствола от вертикального положения; 2 – закручивание секций ствола относительно друг друга; 3 – низкое качество сварных соединений; 4 – некачественное изготовление фланцев; 5 – устройство соединения ствола с фундаментом путем приварки фланцев к фундаментной плите;

б – повреждения мачт сотовой связи: механические повреждения:

- 1 – искривления, погнутости элементов; 2 – трещины в поясах у основания ствола; коррозионный износ: 3 – нарушение лакокрасочного покрытия (светодневной маркировки); 4 – нарушение коррозионной защиты и коррозионный износ конструкций мачт

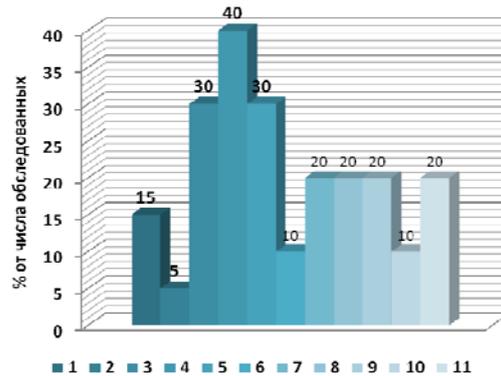


Рис. 4. Дефекты мачт, допущенные на стадиях монтажа и эксплуатации:  
1 – применение профилей элементов, не соответствующих проектным решениям;  
2 – соединение фланцев с помощью сварки; 3 – прокладка между фланцами металлических пластин; 4 – неправильная ориентация секций по вертикали;  
5 – неравномерное предварительное натяжения оттяжек одного яруса при разнице в величинах натяжений более 160 %; 6 – отсутствие предварительного натяжения в оттяжках; 7 – отклонение осей оттяжек от проектного положения в горизонтальной плоскости; 8 – отклонение осей оттяжек от проектного положения в вертикальной плоскости; 9 – неверное расположение зажимов на оттяжках; 10 – устройство отверстий в поясах ствола с целью отведения влаги при отсутствии заглушек; 11 – расположение на сооружении большего количества технологического оборудования, чем это предусмотрено в проекте

**Совершенствование методики расчета начальных напряжений оттяжек мачт.** Исходя из анализа результатов обследования мачт (рис. 2), одним из наиболее распространенных несовершенств, допущенных на стадии проектирования, является отсутствие в проектной документации указаний о предварительных натяжениях оттяжек. Подобные несовершенства были обнаружены у 70 % обследованных мачт. Данное обстоятельство практически обусловлено представлением методики расчета в технической литературе в несколько сложном виде, а также трудоемкостью расчетных операций в связи с необходимостью учета различных сочетаний нагрузок и предельных состояний. В литературе отсутствуют четкие сведения о расчетных сочетаниях нагрузок, которые необходимо рассматривать [1, 2, 3, 5].

В европейских нормах имеется отдельный обособленный нормативный документ, посвященный проектированию предварительно напряженных конструкций [6], однако данный нормативный документ приводит лишь общие рекомендации по расчету начальных натяжений оттяжек мачт.

Указано, что силы предварительного натяжения в канатах должны приниматься из условия, что при действии постоянных нагрузок конструкция имеет требуемую геометрическую форму и распределение напряжений.

Расчет предварительных натяжений выполняется в два этапа:

1 Определение перемещений и реакций оттяжечных узлов ствола при заданной равномерной распределенной по длине ствола эпюре изгибающих моментов и заданном отклонении верхнего оттяжечного узла (используются уравнения неразрывности упругой линии и уравнения равновесия узла).

2 Определение соответствующих начальных натяжений, а также напряжений в оттяжках и перемещений опорных узлов ствола при различных нагрузках (используются уравнения гибкой нити и уравнения статики).

В литературных источниках при расчете мачт предлагается рассматривать 3 направления ветра для трехгранных мачт и 2 направления ветра для четырехгранных мачт [1, 2, 5]. Задачей исследования было определение критических расчетных направлений ветра с целью упрощения расчетов. Рассмотрен оттяжечный узел мачты с тремя и четырьмя оттяжками в плане. На рис. 5 линиями показана сумма проекций предварительных натяжений в оттяжках при различных направлениях ветра с интервалом  $15^\circ$ . Величина горизонтального распора в направлении на оттяжку трехгранной мачты больше, чем в направлении под углом  $30^\circ$  к оттяжке в 1,155 раз. Величина горизонтального распора в направлении под углом  $45^\circ$  к оттяжке четырехгранной мачты больше, чем в направлении на оттяжку в 1,415 раз.

В соответствии с указаниями ДБН В.1.2-2:2006 [7] величина ветрового давления в направлении на ребро (или на оттяжку) четырехгранной мачты в 1,2 раза выше, чем в направлении на грань (под углом  $45^\circ$  к оттяжке). Для трехгранной мачты ветровое давление в направлении перпендикулярно оттяжки в 0,866 ( $\cos 30^\circ$ ) меньше, чем на грань. Таким образом, из рисунков видно, что критическим расчетным направлением ветра для четырехгранных мачт является направление ветра на одну из оттяжек, или на ребро. Для трехгранных мачт направление ветра на оттяжку является равносильным направлению ветра под углом  $90^\circ$  к одной из оттяжек за счет уменьшения величины ветрового давления. В дальнейшем при расчетах будем рассматривать направление ветра на оттяжку как для трехгранных, так и для четырехгранных мачт.

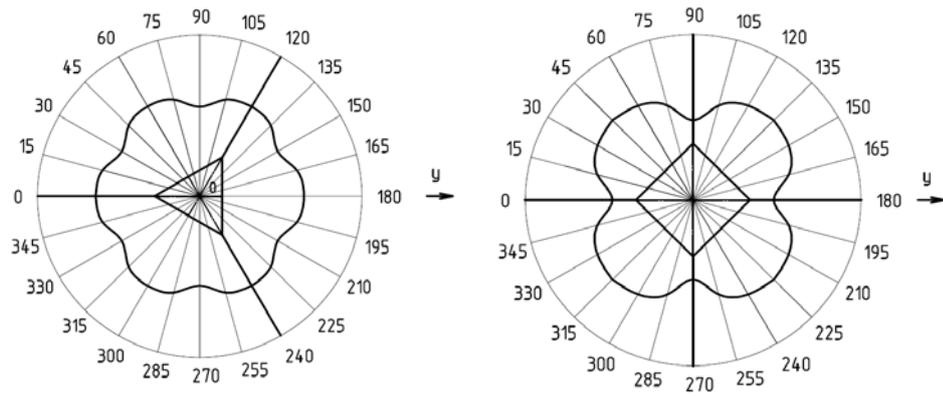


Рис. 5. Изменение суммы проекций сил предварительных натяжений в плоскости действия момента при различных направлениях ветра

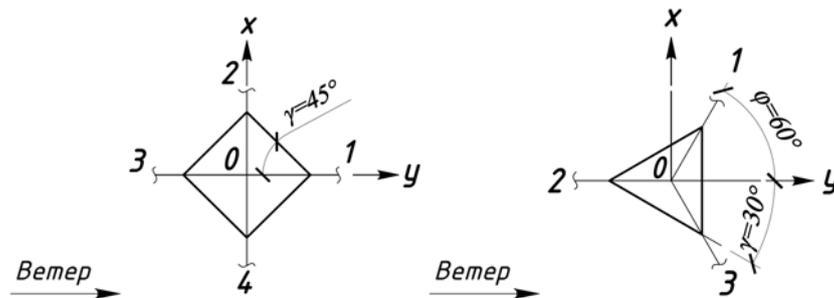


Рис. 6. Расчетные направления ветра для трех- и четырехгранных мачт

Система уравнений расчета оттяжек для четырехгранной мачты имеет вид:

$$\begin{cases} B \left( \left( \sigma_3 - \frac{D_3}{\sigma_3^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{D_0}{\sigma_0^2} \right) \right) = y; \\ -B \left( \left( \sigma_1 - \frac{D_1}{\sigma_1^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{D_0}{\sigma_0^2} \right) \right) = y; \\ (\sigma_3 - \sigma_1) \sin \beta A = H. \end{cases}$$

Система уравнений расчета оттяжек трехгранной мачты имеет вид:

$$\begin{cases} B \left( \left( \sigma_2 - \frac{D_2}{\sigma_2^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{D_0}{\sigma_0^2} \right) \right) = y; \\ -B \left( \left( \sigma_1 - \frac{D_1}{\sigma_1^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{D_0}{\sigma_0^2} \right) \right) = y \cos 60^\circ; \\ (\sigma_2 - 2\sigma_1 \cos 60^\circ) \sin \beta A = H, \end{cases}$$

где  $B = \frac{l}{E \sin \beta}$ ;  $\beta$  – угол наклона оттяжки к вертикали;

$$D_i = \frac{\gamma_i^2 l^2 E}{24};$$

$\gamma_i$  – объемная плотность каната, Н/м<sup>3</sup>;  $l$  – длина оттяжки, м;  $E$  – модуль упругости оттяжек.

Объемная плотность каната определяется как:

а) при отсутствии нагрузки

$$\gamma_0 = \frac{g}{A};$$

б) для наветренной оттяжки – с учетом положительного давления ветра

$$\gamma_3 = \gamma_{но} = \frac{g}{A} + \frac{W \cos \beta}{A},$$

для заветренной оттяжки – с учетом отрицательного давления ветра

$$в) \gamma_1 = \gamma_{зо} = \frac{g}{A} - \frac{W \cos \beta}{A},$$

где  $g$  – погонная масса каната, Н/м;  $A$  – площадь поперечного сечения оттяжки, м<sup>2</sup>;  $W$  – погонная нагрузка от ветра на оттяжку, Н/м.

Преобразование системы уравнений с учетом температурных воздействий для четырехгранной мачты:

$$\begin{cases} B \left( \sigma_3 + \alpha E(t - t_0) - \frac{\gamma_3^2 l^2 E}{24 \sigma_3^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 l^2 E}{24 \sigma_0^2} \right) = y + \Delta H \operatorname{tg} \beta \\ -B \left( \sigma_1 + \alpha E(t - t_0) - \frac{\gamma_1^2 l^2 E}{24 \sigma_1^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 l^2 E}{24 \sigma_0^2} \right) = y + \Delta H \operatorname{tg} \beta \\ (\sigma_3 - \sigma_1) \sin \beta \cdot A = H \end{cases} ,$$

где  $\Delta H$  – продольные деформации ствола от воздействия температуры.

Для трехгранной мачты преобразования выполняются аналогичным образом.

При гололедно-ветровых воздействиях изменяется объемная плотность канатов с учетом веса гололедных отложений на оттяжках. Для наветренной оттяжки объемный вес каната при этом вычисляется как для наветренной оттяжки:

$$\gamma_3 = \gamma_{no} = \frac{g}{A} + \frac{W \cos \beta}{A} + \frac{G}{A} ,$$

для заветренной оттяжки

$$\gamma_1 = \gamma_{zo} = \frac{g}{A} - \frac{W \cos \beta}{A} + \frac{G}{A} ,$$

где  $G$  – распределенная нагрузка от веса гололедных отложений, Н/м.

В проекте требуется указывать значения монтажных натяжений в канатах оттяжек при среднегодовой температуре воздуха в районе установки мачты, а также при температуре  $\pm 40^\circ\text{C}$  [8]. Монтажные натяжения в наветренной и заветренной оттяжках равны. Составление уравнения равновесия узла не требуется. Монтажные напряжения можно определить путем решения одного квадратного уравнения. При учете продольных температурных деформаций ствола монтажные напряжения для четырехгранной мачты определяются из уравнения

$$B \left( \left( \sigma_m + \alpha E \Delta t - \frac{D_0}{\sigma_m^2} \right) - \left( \sigma_0 - \frac{D_0}{\sigma_0^2} \right) \right) = \Delta H \cdot \operatorname{tg} \beta ,$$

где  $\Delta t = t - t_0$  – перепад температуры;  $t$  – температура для расчета монтажных натяжений ( $\pm 40$  °C);  $t_0$  – расчетная температура для предварительных натяжений;  $\sigma_m$  – монтажные напряжения.

Расчетные сочетания нагрузок для определения требуемого предварительного натяжения имеют следующую значимость:

- 1 Сочетание нагрузок ветра и температуры теплого периода года – критическое сочетание нагрузок из условия деформативности.
- 2 Максимальные усилия в оттяжке возникают при сочетании нагрузок ветра и температуры холодного периода года.
- 3 Сочетание гололедно-ветровой нагрузки и соответствующей отрицательной температуры не является критическим из условия прочности. Перемещения при данном сочетании нагрузок не превышают допустимые.

При определении предварительных напряжений оттяжек первого уровня достаточно одной итерации (предварительного задания начальных напряжений). Погрешность равна менее 0,001 %. В соответствии с полученными результатами исследования совершенствован алгоритм расчета предварительных напряжений оттяжек мачт.

**Совершенствование методики расчета ветрового давления на мачты, расположенные на покрытиях существующих зданий.** Первым и ответственным этапом при проектировании сооружений является определение расчетных нагрузок. Наиболее значимой нагрузкой на мачты, представляющие собой один из видов высотных сооружений, является ветровая нагрузка. Необходимо, чтобы расчетная схема нагрузки наиболее точно отображала характер действительного ветрового воздействия. При расчете величины ветрового давления на мачты в соответствии с нормативными документами [7, 9] учитываются аэродинамические коэффициенты пространственных решетчатых конструкций ствола, канатов оттяжек, а также технологического оборудования. Однако нижестоящее опорное здание также обладает собственными аэродинамическими свойствами, которые оказывают влияние на величину ветрового давления на конструкции, расположенные в окрестности здания [10, 11] и над зданием. При взаимодействии ветрового потока со зданием свойства его меняются. Переменными являются как направление, так и скорость ветра [12, 13, 14]. В существующих методиках расчета ветровой нагрузки на мачты влияние обтекания ветром нижерасположенного здания на величину нагрузки на конструкции мачты не учитывается [7, 9, 15, 16].

С целью исследования свойств ветрового потока над поверхностью опорного здания проводился эксперимент в аэродинамической трубе института стальных конструкций Технического университета г. Брауншвайг (Германия).

Для осей измерений «в центре» при углах действия ветра от  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и для положения измерительного прибора «на диагонали» при углах действия ветра  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $180^\circ$  были получены следующие кривые:

1 – Средней скорости ветра.

2 – Интенсивности турбулентности.

3 – Спектральной плотности для всех высотных точек профиля в зависимости от частоты.

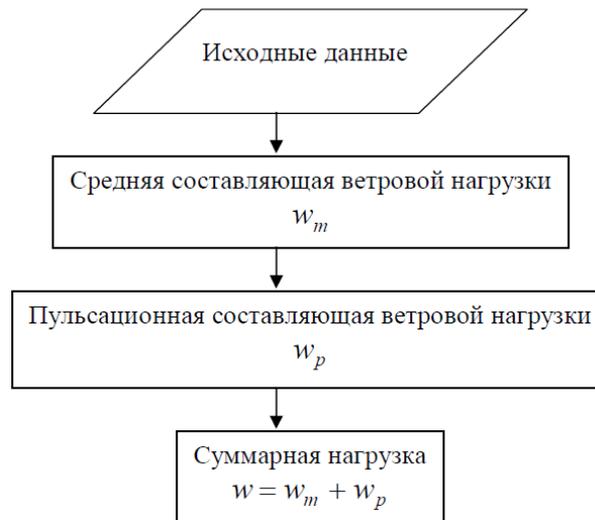
4 – Уточняющего коэффициента превышения средней скорости ветра, зависящего от нормированной высоты  $z/h$  объекта, где  $z$  – высота над поверхностью земли,  $h$  – высота существующего здания.

Значительные увеличения скорости ветра наблюдаются как по оси 1 (положение «в центре»), так и по оси 2 (положение «на диагонали»). Однако максимальные значения возникают по оси 1 при угле действия ветра  $\theta = 45^\circ$ , по оси 2 – при угле действия ветра  $\theta = 180^\circ$ . То есть в двух случаях – при направлении ветра по диагонали здания.

Уточняющий коэффициент превышения средней скорости ветра принимает значения от 1,00 до 1,15. Следовательно, при обтекании ветром здания происходит максимальное увеличение средней скорости ветра до 15 % и, соответственно, увеличение ветрового давления до 32 %, что до сих пор не учитывается в методиках расчета ветровой нагрузки.

В соответствии со СНиП 2.01.07-85\* [3] ветровую нагрузку следует определять как сумму средней и пульсационной составляющих (рис. 7, а). В соответствии со совершенствованной методикой при расчете ветрового давления предлагается учитывать превышение нормативного ветрового давления путем введения уточняющего безразмерного коэффициента  $\beta$ , зависящего от высоты опорного здания  $H$  и высоты рассматриваемой мачты (или другого типа опор сотовой связи)  $h$ . Алгоритм уточненной методики расчета изображен на рис. 7,б.

а



б

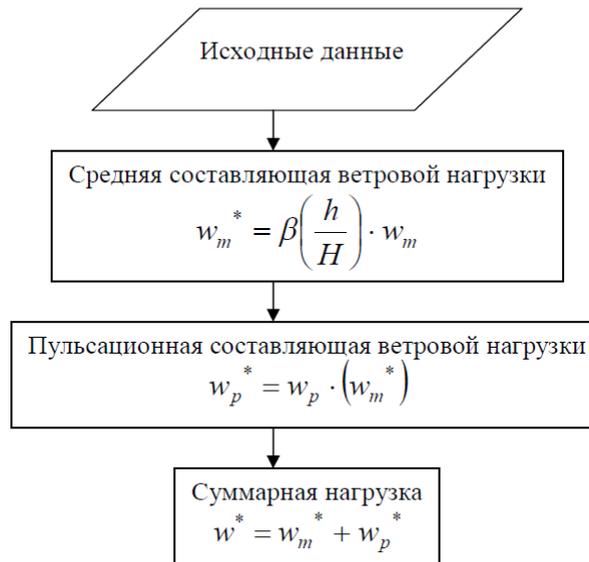


Рис. 7. Методика расчета ветрового давления на конструкции мачт:  
а – в соответствии с СНиП 2.01.07-85\* [3]; б – с учетом увеличения ветрового  
давления вследствие обтекания опорного здания

## Литература

- [1] Савицкий Г.А. Основы расчета радиомачт: статика и динамика / Савицкий Г.А. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам радио и связи, 1953. – 111с.
- [2] Соколов А.Г. Опоры линий передач [расчет и конструирование] / Соколов А.Г. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 171 с.
- [3] Металлические конструкции: [под редакцией Н.С. Стрелецкого и др.]. - М: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 776 с.
- [4] Губанов В.В. Анализ конструктивных решений и технического состояния мачт / Губанов В.В., Межинская И.В. // СПГС. – 2011, том 7, выпуск 2. – С. 226–235.
- [5] Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Савицкий Г.А. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 111 с.
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components / British Standards BSI. – London, 2006. – 36 с.
- [7] ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування / Державні будівельні норми України. – Офіційне видання. – К.: Мінбуд України, 2006. – 78 с.
- [8] ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції / Державні будівельні норми України. – Офіційне видання. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 127с.
- [9] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 3–1: Türme, Maste und Schornsteine – Türme und Maste / Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. – Berlin, 2010. – 93с.
- [10] Aldasoro H. A. Beeinflussung der Windstruktur an Schornsteinen durch umgebende Industriebebauung / Aldasoro H. A., Höbbel T., Clobes M. // DAST-Kolloquium Stahlbau 2010, Weimar, 5–6 Oktober. – Weimar, 2010.
- [11] Clobes, M. Böenbeanspruchung von Industrieschornsteinen unter Berücksichtigung umgebender Industriebebauung / Clobes, M. & Aizpurua Aldasoro, H. // 12 Dreiländertagung der Windtechnologischen Gesellschaft e.V., Aachen, 2011. – Aachen, 2011.
- [12] Ruscheweyh H. Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Band 1 / Ruscheweyh H. – Berlin: Bauverlag GMBH, 2007. – 96с.
- [13] Ruscheweyh H. Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Band 2 / Ruscheweyh H. – Berlin: Bauverlag GMBH, 2007. – 184с.
- [14] Симиу Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Симиу Э., Сканлан Р. [перевод с английского Маслова Б.Е., Швецовою А.В.]. – Москва: Стройиздат, 1984. – 358 с.

- [15] СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия / Госстрой России. – Издание официальное. – М.: ФГУП, 2005. – 44с.
- [16] CSA Standard. Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures. S37-01/ Canadians Standard Association – Toronto, Ontario, Kanada: Canadians Standard Association, 2001. – 119 с.

*Надійшла до редколегії 09.05.2012 р.*