Записки Санкт-Петербургского горн
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.24.05

И.Г.ШЕЛКОВНИКОВ, Н.Д.МИХАЙЛОВА
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ МАКСВЕЛЛА - КРЕМОНЫ В РАСЧЕТЕ БУРОВЫХ ВЫШЕК

В области строительной механики усилия в стержнях неизменяемых ферм, возникающие под действием статической нагрузки, часто определяются с помощью графостатического метода построения совмещенной диаграммы Максвелла - Кремоны. Обычно рассматриваются плоские статически определимые фермы, которые могут образовывать и пространственные конструкции. Преимуществами такого метода можно считать наглядность, компактность построения усилий-векторов, возможность быстрого нахождения ошибки и оценки в целом нагруженности фермы. В особенности эти преимущества видны при расчетах усилий, возникающих в решетках граней буровых вышек и других подобных конструкциях под действием ветровой нагрузки. В случае вертикальной буровой вышки решетка ее грани, т.е. конструктивная часть фермы, ограниченная стержнями внешнего контура, создает необходимую жесткость и воспринимает в основном ветровую нагрузку. При этом диаграмма Максвелла - Кремоны позволяет наглядно определить усилия от ветровой нагрузки, действующие в раскосах, поясах и ногах вышки, по абсолютному значению и по знаку (растяжение „+", сжатие „-"), а также параметры соответствующих векторов. Полученные таким образом значения усилий складываются с усилиями, действующими в соответствующих стержнях фермы от собственного веса и полезной нагрузки, и дают возможность сделать полную оценку нагруженности конструкции. Затем производится расчет сечений элементов фермы - участков ног вышки, поясов и раскосов или оценка их работоспособности.

Совмещенная диаграмма Максвелла - Кремоны строится в соответствии со следующими принципами:

ферма должна быть статически определима, т.е. удовлетворять условию $n = 2k - 3$, где n - число стержней; k - число узлов; визуальный анализ не выявляет „лишних" стержней;

построение сил и усилий в узлах производится по правилу силовых многоугольников - конец вектора предыдущей силы (усилия) является началом последующей, каждая из сил (усилий) представляет уравновешивающую;

выбранное направление обхода узлов (по часовой или против часовой стрелки) соблюдается до конца построения диаграммы;

следует начинать диаграмму с построения многоугольника внешних сил и реакций (контура диаграммы) и затем переходить к построению узлов -

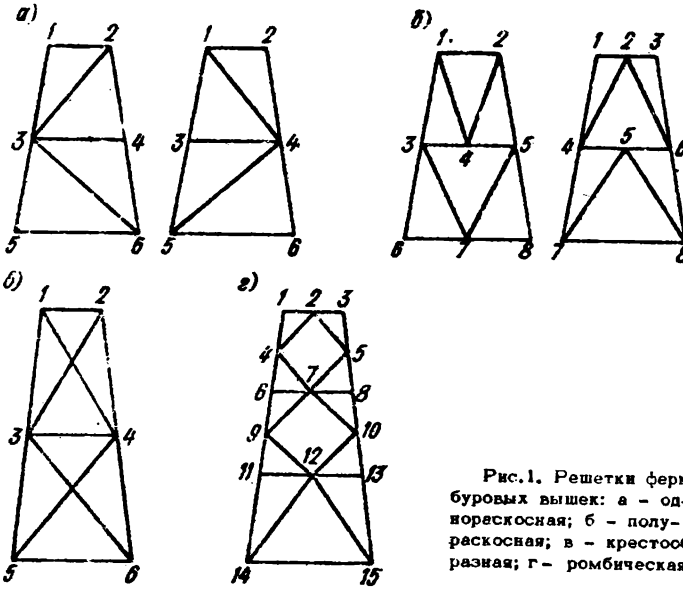


Рис.1. Решетки ферм буровых вышек: а - однораскосная; б - полураскосная; в - крестообразная; г - ромбическая

сил и усилий в них, начиная и продолжая с тех, где сходится не более двух неизвестных сил (усилий); следует соблюдать правило переноса стрелок векторов с совмещенной диаграммы на чертеж фермы - стрелка с диаграммы переносится на ближний к узлу конец соответствующего стержня, затем на другом конце откладывается стрелка противоположного направления; таким образом, найденное усилие в стержне обозначается двумя стрелками: к узлам - сжатие, от узлов - растяжение.

Буровые вышки представляют собой пространственные фермы в виде четырехгранной усеченной пирамиды, каждая грань которой является плоской фермой. Наиболее распространенными формами решеток граней буровых вышек являются однораскосная, полураскосная, крестообразная и ромбическая (рис.I).

В соответствии с изложенными принципам статически определимы решетки на рис.I,а,б,г, так как удовлетворяют условию $n = 2k - 3$ и не являются изменяемыми по визуальному анализу. В случае рис.I,г с целью неизменяемости ромбической решетки вводится нижняя "замковая" секция II-I2-I3-I5-I4, которая создает жесткость всей ферме и восстанавливает условие $n = 2k - 3$ (без этой секции $n < 2k - 3$, что свидетельствует об изменяемости конструкции).

Статически неопределимой является крестообразная решетка, наиболее широко используемая в конструкциях буровых вышек, так как $n > 2k - 3$. В этом случае рекомендуется применять метод исключения "лишних" стержней при известных приложениях внешних нагрузок и виде раскосов. Так, например, если ветровая нагрузка приложена горизонтально к узлам I, 3 и 5 (рис.I,в), а раскосы выполнены в виде тонкой прутковой стали, можно исключить при построении диаграммы стержни I-4 и 3-6, так как они должны были бы работать на сжатие, что для них невозможно. Расчетными оставляют только раско-

сы 3–2 и 5–4, работающие на растяжение, при этом восстанавливается условие $n = 2k - 3$ и ферма становится как бы однораскосной.

Возможен и другой метод для нахождения усилий в стержнях крестообразной фермы – разложение ее на две однораскосные и приложение к каждой половинных начальных нагрузок. В этом случае каждая составляющая ферма соответствует условию $n = 2k - 3$ и для ее решения может быть построена диаграмма. Суммарные усилия в одноименных стержнях и будут являться расчетными.

Приведем примеры определения усилий в элементах буровых вышек от ветровой нагрузки с помощью диаграммы Максвелла – Кремоны. Сделаем некоторые пояснения. Буровая четырехгранная вышка воспринимает действие ветра с наибольшей силой, когда направление ветра перпендикулярно проекции на вертикальную плоскость одной из двух противоположных граней вышки (рис.2,а). Две грани – наветренная и заветренная – воспринимают давление ветра, пропорциональное скоростному напору, аэродинамическим характеристикам элементов конструкции и степени заполнения решетки грани, и передают две другим, параллельным направлению ветра, как ветровую нагрузку. По этому давлению вычисляются силы ветра W_1, W_2 и т.д. (рис.2,а)

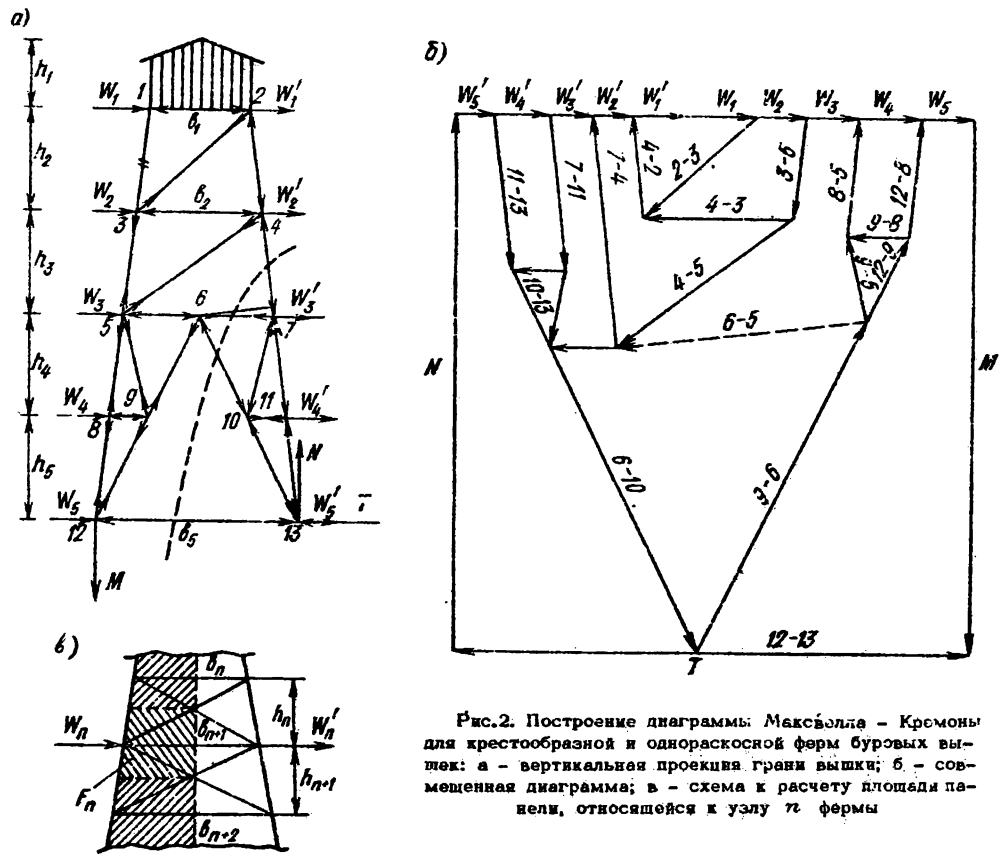


Рис.2. Построение диаграммы Максвелла – Кремоны для крестообразной и однораскосной ферм буровых вышек: а – вертикальная проекция грани вышки; б – совмещенная диаграмма; в – схема к расчету площади панели, относящейся к узлу n фермы

приложенные к узлам фермы, являющимся геометрическими точками пересечения осей ног вышки и поясов. При этом каждая из сил определяется как произведение давления ветра на площадь трапеции, образованной точками на середине линий, соединяющих ближайшие узлы фермы по поясу и ноге вышки.

Сила ветра, действующая на узел n_i с наветренной грани (рис.2,в),

$$W_n = P_0 n_э \beta c_a \varphi F_n,$$

где P_0 – скоростной напор ветра, Па; $n_э$ – коэффициент возрастания скоростного напора с высотой, n = I÷I,65; β – коэффициент динамического воздействия, вызываемого пульсацией ветра, β = I,05÷I,36; c_a – аэродинамический коэффициент; φ – коэффициент заполнения панели, относящейся к узлу n_i; F_n – расчетная площадь панели, относящейся к узлу n_i; с заветренной грани

$$W_n' = P_0 n \beta c_a \varphi F_n m_э,$$

где $m_э$ – коэффициент ослабления ветра, действующего на заветренную грань.

По величине скоростного напора вся территория нашей страны разделена на семь районов с P_0, равным соответственно 270, 350, 450, 550, 700, 850 и I000 Па (ГОСТ I45I-77). Для горных и малоизученных местностей скоростной напор рассчитывается по формуле $P_0 = \rho v^2/2$, где ρ – плотность воздуха, кг/м^3; v – скорость ветра на высоте I0 м от поверхности земли, м/с.

Аэродинамический коэффициент c_a в зависимости от конфигурации обтекаемого элемента фермы имеет значения: для обшитых поверхностей с наветренной стороны 0,8, с заветренной 0,6; для равнобоких уголков 2; для стержней круглого сечения 0,7-I,2[x].

Для необшитых буровых вышек коэффициент заполнения φ обычно принимают 0,I5 или 0,20 и соответственно $m_э$ = 0,84÷0,96 или $m_э$ = 0,75÷0,93.

Площадь панели рассчитывается по формуле (рис.2,в)

$$F_n = \frac{(b_n + 2b_{n+1} + b_{n+2})(h_n + h_{n+1})}{16}.$$

При наличии фонаря на буровой вышке исключением из расчета по приведенным формулам являются W_1 и W_1'

$$W_1 = P_0 n \beta (0{,}8F_\Phi) + P_0 n \beta c_a \varphi F_1,$$

где

$$F_\Phi = 1/2 b_1 h_1;\ F_1 = \frac{(3b_1 + b_2)h_2}{16};\ W_1' = P_0 n \beta (0{,}6F_\Phi) + P_0 n \beta c_a \varphi F_1 m_э \text{ (рис.2,а)}.$$

---

[x] А.Н. Кирсанов, В.П. Зиненко, В.Г. Кардыш. Буровые машины и механизмы. М.: Недра, 1981.

Пример I. На буровую четырехгранную вышку с крестообразной решеткой действует ветер, силы которого вычислены по приведенным формулам и приложены к соответствующим узлам в виде векторов (рис.2,а). Необходимо определить с помощью диаграммы Максвелла – Кремоны усилия в стержнях грани вышки, параллельной направлению ветра.

Предположим, что раскосы фермы грани выполнены из тонкой прутковой стали. Тогда удалим лишние стержни I–4 и 3–7, работающие на сжатие (на рис.2,а они отсутствуют), и приведем решетку фермы к однораскосному виду, при котором выполняется условие $n = 2k - 3$. В данном случае $n = 2 \cdot 13 - 3 = 23$, что соответствует числу стержней. Следовательно, ферма статически определима. Визуальный анализ показывает, что она неизменяема – нет в конструкции ячеек, представляющих четырех-, пяти- и т.д. угольники. Основой неизменяемости является треугольник.

Далее исключим из дальнейших построений нулевые, т.е. заведомо ненагруженные стержни в соответствии с двумя леммами: если имеется узел, где сходятся два стержня, и на него действует сила, совпадающая по направлению с одним из стержней, то другой стержень является нулевым; если имеется ненагруженный узел, где сходятся три стержня, два из которых являются продолжением один другого, третий стержень в этом случае будет нулевым. В нашем примере (рис.2,а) нулевым будет стержень I–3, помеченный двумя черточками.

Переходим к построению многоугольника – контура внешних сил в выбранном масштабе, определив величины реакции опор фермы M, N и T из уравнений статики по формулам: $T = \sum_{i=1}^{5} W_i$; $\sum X = 0$;

$$M = N = \frac{W_1(h_2 + h_3 + \ldots + h_5) + W_2(h_3 + h_4 + h_5) + \ldots W_4 h_5}{b_5}; \quad \sum M = 0.$$

Выбираем направление обхода фермы и каждого узла против часовой стрелки. Начав с вектора W_5', ведем построение контура внешних сил и всей диаграммы сверху вниз (рис.2,б), что удобнее для планирования размещения рисунков. Контур образуют силы W_5', W_4', ..., W_1', W_1, W_2, W_3, M, T, N. Так как стержень I–3 нулевой, в стержне I–2 действует усилие сжатия, равное W_1, что отмечается соответствующими стрелками, направленными к узлам I и 2. Далее переходим к узлу 2, так как в нем два неизвестных усилия, и начинаем обход с крайней правой силы W_1', строя четырехугольник сил W_1', W_1, 2–3, 4–2. Переносим стрелки с диаграммы (рис.2,б), на проекцию грани (рис.2,а), после чего переходим к построению узла 3 (рис.2,а), затем узла 4. Дальнейшее построение диаграммы приостанавливается, так как все оставшиеся узлы имеют более двух неизвестных усилий. Необходимо в каком-то из них определить одно из этих усилий, после чего построение можно продолжить.

Воспользуемся методом вырезания узлов (рис.2,а, пунктир) и составим уравнение моментов отрезанной части относительно узла 6:

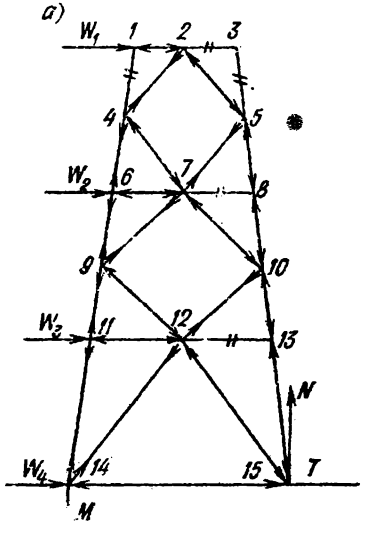
$$\Sigma M = F_{4-7}\, l + T(h_4+h_5) - N(b_5/2) - W_4' h_4 - W_5'(h_4+h_5) - F_{12-13}(h_4+h_5) = 0.$$

Определим вектор усилия F_{12-13} и начнем построение на диаграмме узла I3, оканчивающееся определением усилий в стержнях II-I3 и I0-I3. Дальнейшие построения узлов идут в последовательности II-I0-7-I2-8-9-6 (может быть и другая последовательность). Завершающим диаграмму в данном случае является вектор 5-6 (пунктир), положение которого отражает накопленную в результате построения графическую ошибку. Она незначительна и не может сказаться на результатах расчета фермы.

Полученные графическим способом значения усилий в стержнях конструкции от ветровой нагрузки складываются с соответствующими усилиями от других нагрузок - полезной и собственного веса, полностью характеризуя работу буровой вышки.

п р и м е р 2. На буровую четырехгранную вышку с ромбической решеткой действует ветер, силы которого приложены к узлам грани только с наветренной стороны (рис.3,а). Необходимо определить с помощью диаграммы Максвелла - Кремоны усилия в стержнях фермы, возникающие от ветровой нагрузки.

Проверяем, соответствует ли ферма условию неизменяемости и статической определимости $n = 2k - 3 = 27$, - соответствует. Визуальный анализ показывает, что ферма также неизменяема благодаря нижней замковой секции II-I2-I3-I5-I4, хотя в ее конструкцию входят два четырехугольника 2-5-7-4 7-I0-I2-9. Затем определяем значения реакций опор фермы M, N и T и переходим к построению многоугольника внешних сил - контура диаграммы (рис.3,б), обходя конструкцию против часовой стрелки. Предварительно, используя приведенные леммы, выделим нулевые стержни I-4, 2-3, 3-5, 7-8, I2-I3,



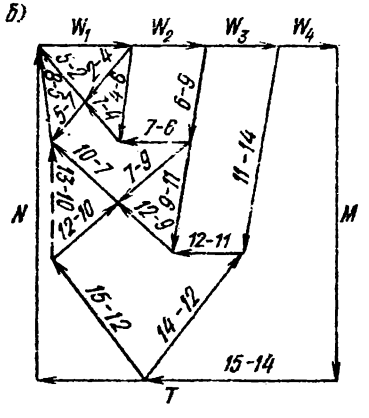


Рис.3. Построение диаграммы Максвелла - Кремоны для фермы с ромбической решеткой: а - вертикальная проекция грани вышки; б - совмещенная диаграмма

Построение начинаем с узла 2, так как в стержне I-2 действует известное усилие сжатия W_1. Построив на диаграмме треугольник сил (рис.3,б) и перенеся стрелки на стержни 2-4 и 5-2 проекции фермы (рис.3,а), переходим к аналогичному построению других узлов в последовательности 4-6-5-7-9-II-I4-I2-I0. Вектор I3-I0 (пунктир) замыкает диаграмму и отражает графическую ошибку. В соответствующем масштабе диаграмма представляет картину нагружения грани вышки с ромбической решеткой ветровой нагрузкой. Как и в первом примере, векторы усилий могут быть использованы для расчета или проверки соответствующих элементов конструкции вышки.

Приведенные примеры можно считать типичными при использовании диаграммы Максвелла - Кремоны в расчетах и оценке работоспособности буровых четырехгранных вышек, подвергающихся воздействию ветровых нагрузок.

Выводы

I. Метод построения совмещенной диаграммы Максвелла - Кремоны позволяет компактно и наглядно определять усилия в элементах ферм - граней буровых вышек, возникающие под действием ветровой нагрузки.

2. Усилия, полученные из диаграммы, служат наиболее целесообразной основой расчета для получения минимальной массы конструкции плоской жесткой фермы, какой должна быть грань буровой вышки.