

стання в тепличних господарствах в опалювальний період потенціалу повітря, що видаляється з приміщення для утримання ВРХ, без застосування традиційних способів забезпечення живлення рослин вуглекислим газом. Таке рішення дає можливість суттєво зменшувати протягом опалювального періоду витрату теплової енергії і зменшує забруднення атмосфери викидами шкідливих речовин.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДБН В2.2.-2-95 Будинки і споруди (теплиці та парники). Державний комітет України у справах містобудування і архітектури. – К., 1995.
2. ВНТП-АПК-10.07 Тепличні і оранжерейні підприємства, споруди захищеного ґрунту.
3. ВНТП-АПК-01.05 Скотарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми). – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 111 с.
4. Строй А.Ф. Теплоснабжение и вентиляция сельскохозяйственных зданий и сооружений. – К.: Вища школа. Главное изд-во, 1983. – 215 с.
5. Строй А.Ф., Гузик Д.В. Формування локального мікроклімату в свинарських приміщеннях Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб. - К.: КНУБА. - Вип. 3, 2001. - С.28-34.
6. Строй А.Ф., Гузик Д.В. Система локального мікроклімату у виробничих сільськогосподарських приміщеннях // «Нова тема», журнал асоціації інженерів енергоефективних технологій України, КНУБА, 2008. – Вип. 2. – С. 24-26.
7. Веліт І.А., Гузик Д.В. Використання натрієвих ламп з різним складом амальгами розрядної трубки для вирощування томатів у закритому ґрунті. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник, № 20 - 2016.
8. Веліт І.А., Гузик Д.В. Натрієві лампи високого тиску з добавками цезію для світло культури рослин. Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 8. Відповідальний редактор П.М.Куліков. – К.: КНУБА, 2016. - С. 60-64.
9. Федяй Б.М., Гузик О.Д., Гузик Д.В. Моделювання теплового режиму будівель при кооперованому утриманні тварин. // Науковий вісник будівництва, № 70. - 2012.
10. Fediai B., Guzyk D. Calculation of air exchange to reduce CO2 by periodic ventilation of cattle buildings. // Ventilyacia, osvtilennya ta teplogazopostachannya, № 20 - 2016.

Рецензент: д-р техн. наук С.Л. Фомін

УДК 624.014

Виноградов В.В.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

К ВОПРОСУ ЗАМЕНЫ РЕШЕТЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛЮ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАЧТОВЫМ СИСТЕМАМ

Введение. Для расчета жесткости, устойчивости и колебаний мачт на оттяжках различного функционального назначения широко используются стержневые модели [1-3]. Подобные модели могут быть эффективно применены при рассмотрении задач оптимизации применительно к мачтам мобильной связи, имеющими относительно небольшую высоту, когда варьируемыми являются законы изменения геометрических характеристик сечений по

высоте мачты [4]. Их эффективность определяется тем, что стержневые модели позволяют использовать математический аппарат теории оптимизации, хорошо апробированный для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Это позволяет существенно сократить объем вычислений.

Вопросам построения жесткостных характеристик стержневых моделей исходя из свойств решетчатых конструкций

посвящен ряд работ [5-7]. Однако вопрос достоверности перехода к стержневой модели, особенно для мачт мобильной связи, проработан недостаточно полно. В настоящей статье на основе расчетно-экспериментального исследования ряда конкретных вариантов даны оценочные сопоставления стержневых и пространственных конструкций.

В работе [4] был продемонстрирован анализ чувствительности и оптимизации на базе стержневой модели. Как было сказано выше использование стержневой модели с приведенными характеристиками момента инерции значительно облегчает эти расчеты. Однако, получение корректного приведенного момента инерции для стержневой модели является сложной задачей. Необходимо сопоставить пространственную конструкцию с принятой стержневой расчетной моделью. Для этой цели было принято решение провести расчетно-теоретические изыскания с использованием современных программных комплексов которые в достаточной мере отражают пространственную работу конструкции. Для расчета пространственной модели секции мачты использовался ПК SCAD Office.

Методика получения приведенных моментов инерции будет продемонстрирована на модельной конструкции высотой 360 см., показанной на рис. 1 а, б. При этом на рис. 1 а изображен общий вид решетчатой конструкции (мачты) в горизонтальном положении, а на рис. 1 б изображена секция.

Параметры секции: высота (длина поясов) $H=0,6$ м размерами в плане $b=0,15$ м. шаг крепления раскосов $l=0,15$ м. Модель, как пояса, так и раскоса, выполнена из арматурной проволоки гладкого профиля класса А240 диаметром $\varnothing 4$ мм. Соединение элементов осуществляется сваркой.

Принципиальным является то обстоятельство, что эквивалентность пространственной решетчатой конструкции и стержневой модели может быть достигнута только по определенному типу механических характеристик. Поэтому важно обоснованно определить критерий иден-

тичности. Для мачт мобильной связи одним из важных технологических показателей является перемещение верхнего обреза мачты, где обычно размещается аппаратура, при действии некоторых статических изгибающих нагрузок. На основе такого критерия формируется и ряд задач оптимизации, состоящих в нахождении законов изменения геометрических характеристик по высоте мачты, сообщающих минимальное перемещение верхней площадки при фиксированном (объеме) весе всей конструкции.

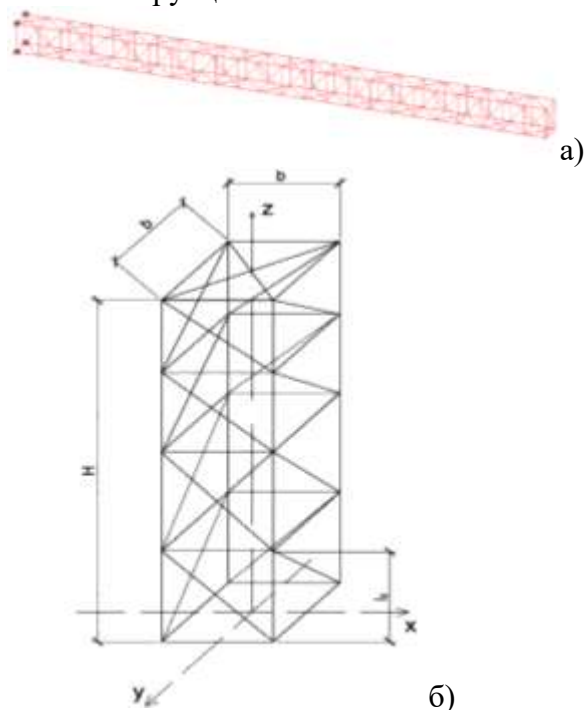


Рис. 1. Общий вид конструкции

Рассмотрим вначале решетчатую конструкцию длиной (высотой) 360 см, изображенную на рис. 1 а. Будем считать, что мачта упруго закреплена в основании ($z=0$) и нагружена силой P приложенной в центре верхней площадки ($z=360$ см) и действующей в плоскости zy . Изгибная деформация стержня, имеющего ту же длину, что и решетчатая конструкция, с модулем упругости материала E и моментом инерции поперечного сечения I относительно оси x , описывается краевой задачей для системы дифференциальных уравнений [8]

$$\frac{dv}{dz} = \varphi; \quad \frac{d\varphi}{dz} = -\frac{M}{EI}; \quad \frac{dM}{dz} = Q; \quad \frac{dQ}{dz} = -q; \quad (1)$$

с граничными условиями
 $v(0) = 0; \quad M(0) + c_{\varphi}\varphi(0) = 0;$

$$M(H) = 0; \quad Q(H) = P; \quad (2)$$

Здесь v , φ , M , Q - соответственно перемещение, угол поворота, изгибающий момент и перерезывающая сила. Распределенная изгибающая нагрузка q может отвечать различным типам воздействий. Линейное упругое закрепление относительно углов поворота в основании характеризуется жесткостью c_φ .

Будем считать, что выбор граничных условий не сильно влияет на деформационные свойства «тела» мачты. Исходя из этого примем, что в точке $z=0$ имеет место жесткое закрепление как решетчатой конструкции, так и стержня. В качестве базисной величины примем момент инерции поперечного сечения $I_p = F_p \cdot b^2$, где $F_p = 0,04\pi \text{ см}^2$ - площадь поперечного сечения каждого из четырех поясов, $b=15 \text{ см}$ - расстояние между поясами (рис. 1 б). Таким образом $I_p = 28,27 \text{ см}^4$.

Отметим, что величина I_p может быть подсчитана с помощью программы «конструктор сечений» для любых видов поперечных сечений и количества поясов.

Положим, что момент инерции эквивалентного стержня $I = \alpha I_p$. Коэффициент α находится из условия равенства перемещения верхнего обреза решетчатой конструкции v_s , подсчитанного на основе комплекса SCAD, и перемещения консольного стержня, нагруженного той же силой P на конце:

$$v_s = \frac{P \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot \alpha \cdot I_p}$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{P \cdot H^3}{3 \cdot E \cdot I_p \cdot v_s} \quad (3)$$

Расчет для $H=360 \text{ см}$ по формуле (3) дает для коэффициента эквивалентности величину $\alpha=0,971$. Аналогичный расчет для секции $H=60 \text{ см}$ (рис.1 б) дает результат $\alpha=0,872$. Такое отличие в коэффициентах эквивалентности отражает тот физический понятный эффект, состоящий в том, что чем меньше отношение размеров в плане к высоте (длине) модели, тем ближе она по своим свойствам к стержням.

Для более детального анализа особенностей деформирования секции мачты было осуществлено экспериментальное

исследование изгибных деформаций секции в плоскости уз. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2. На рис. 3 приведена фотография экспериментальной установки. На рис.4 дана схема крепления датчиков.

Секция приваривалась в сечении $z=0$ к пластине $20 \times 20 \times 0,8 \text{ см}$, которая, в свою очередь, крепилась к испытательному стенду с помощью достаточно жесткой переходной плиты. Пластина крепилась к переходной плите с помощью болтов диаметром 14 мм .

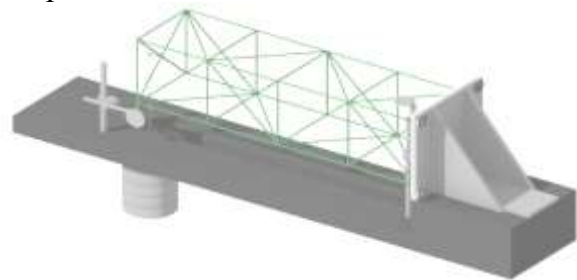


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки с моделью секции мачты



Рис. 3. Фото экспериментальной установки и модели секции мачты

Испытания осуществлялись в лаборатории кафедры строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Величины сосредоточенной нагрузки P менялась с шагом 1 кг от $7,5 \text{ кг}$ до $11,5 \text{ кг}$. Величины перемещений снимались с помощью датчиков часового типа НЧ-10. Для $P < 7 \text{ кг}$ значение перемещений были вне зоны чувствительности датчиков.

В табл. 1 приведены результаты серии проведенных экспериментов.

Датчики были установлены в точке приложения нагрузки и в зоне крепления к плите. Датчик 2 показывает перемещение $v(H)$ в точке приложения сосредоточенной силы P . Датчик 3 показывает перемещения

$w(0)$ точки крепления конструкции, отстоящей от оси z на расстояние $b/2$ в направлении оси z .

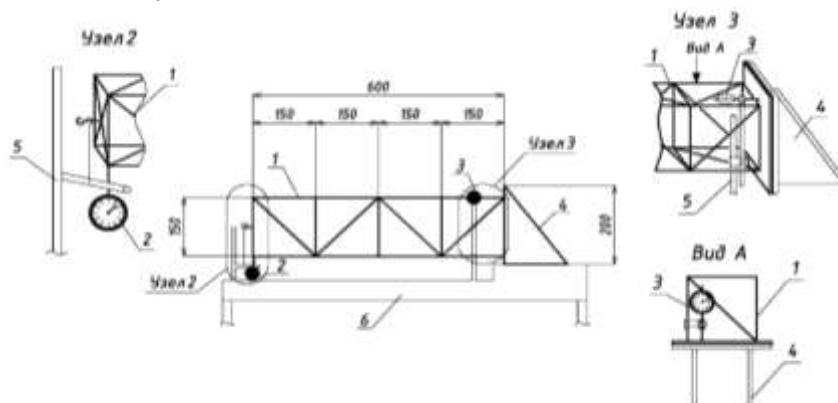


Рис. 4 Схема расположения датчиков

1 - Секция мачты; 2 - Датчик НЧ-10 для перемещения верхнего обреза перпендикулярно оси z ; 3 - Датчик НЧ-10 для перемещение в направлении оси z ; 4 - Переходная плита (основание); 5 - Держатель датчик НЧ-10; 6 - Станина.

Таблица 1 - Данные проведенных экспериментов

Нагрузка кг.	Эксперимент 1		Эксперимент 2		Эксперимент 3		$v_s (H)$ мм
	Датчик мм	Датчик мм	Датчик мм	Датчик мм	Датчик мм	Датчик мм	
7.5	0,21	0,014	0,22	0,015	0,21	0,014	0,12
8.5	0,27	0,021	0,26	0,022	0,26	0,022	0,14
9.5	0,32	0,026	0,32	0,025	0,32	0,026	0,16
10.5	0,36	0,03	0,37	0,028	0,37	0,029	0,17
11.5	0,45	0,041	0,44	0,04	0,45	0,041	0,19

Будем считать, что эквивалентной стержневой моделью экспериментальной конструкции будет балка, показана на рис. 5. Балка упруго закреплена в сечении $z=0$ на пружине жесткостью c_ϕ относительно угловых перемещений, и описывается краевой задачей (1), (2), где q - распределенная весовая нагрузка, которую необходимо учитывать вследствие горизонтального расположения экспериментального образца.

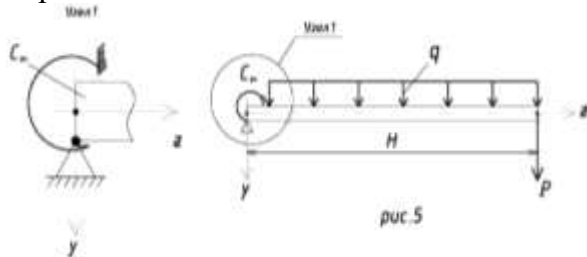


Рис. 5/ Эквивалентная стержневая модель

Отметим, что система, показана на рис. 5 является статически определимой.

Поэтому изгибающие моменты и перерезывающие силы могут быть найдены без рассмотрения деформаций стержня.

Из краевой задачи (1), (2) имеем

$$Q(z) = q(H - z) + P;$$

$$M(z) = \frac{q}{2}(H^2 - z^2) - (P + qH)(H - z)$$

Значение изгибающего момента в сечении $z=0$:

$$M(0) = -PH - \frac{qH^2}{2}.$$

Жесткость c_ϕ может быть найдена из соотношений (2)

$$c_\phi = -\frac{M(0)}{\phi(0)}.$$

(4)

Следует иметь в виду, что жесткость c_ϕ характеризует упругие свойства узла крепления секции в комплексе. Распределенная

весовая нагрузка q получается из простого соотношения

$$q = \gamma \frac{V}{H},$$

где γ - удельный вес материала, V - общий объем поясов и раскосов.

Следует отметить, что для $P < 7$ кг значение перемещений $v(H)$ были вне зоны чувствительности датчиков данного типа. Это обстоятельство следует также учитывать и при оценке величины $w(0)$ в сечении $z=0$. Эти величины следует рассматривать только как качественный показатель наличия нежесткого закрепления.

Приведенный в таблице 1 результаты трех серий экспериментов имеют незначительный разброс. В последнем столбце таблицы приведены результаты расчетов перемещения $v_s(H)$ на основе ПК SCAD для секции, но с учетом действия весовой нагрузки, перпендикулярно оси z . Отличия величин перемещения сечения $z=H$, полученных путем расчета и эксперимента, характеризуют, наряду с величинами $w(0)$, наличие упругого закрепления.

Далее предлагается перейти к рассмотрению модели в виде балки, показанной на рис. 5, для $I = \alpha I_p$, где $\alpha = 0,872$ найденное ранее для секции. Естественным является предположение, что при корректных переходах жесткости c_ϕ не будет сильно зависеть от величины нагрузки. Имея величины $v(H)$ для различных нагрузок P , можно «восстановить» путем последовательных пересчетов, основываясь на краевой задаче (1), (2) и формуле (4), значение жесткости c_ϕ . Данные соответствующего вычислительного эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Пересчет жесткости c_ϕ

P , кг	$v(x)$	c_ϕ , кг·см	$\frac{c_\phi - \bar{c}_\phi}{c_\phi}$, %
8.5	0,027	113021,737	8,6 %
9.5	0,032	106635,802	2,5 %
10.5	0,036	104798,779	0,7 %
11.5	0,045	91864,3173	-11,7%

В первом столбце показаны величины сосредоточенной силы, а во втором и третьем столбцах даны экспериментальные

перемещение и значение жесткости, подсчитанные по указанной выше процедуре. В последнем столбце показан разброс значений жесткости от средней величины

$\bar{c}_\phi = \sum_{i=1}^4 c_\phi^i / 4$. Авторы приняли такой разброс приемлемым.

Выводы. В работе рассмотрена методика построения эквивалентной стержневой модели для пространственной решетчатой конструкции применительно к мачтам мобильной связи. Эквивалентность обеспечивается равенством перемещения верхнего обреза мачты, рассматриваемой, с одной стороны, как стержень, а с другой – как решетчатая конструкция, для одинаковых статических изгибаемых нагрузках. Решетчатая конструкция рассчитывается на основе ПК SCAD, а стержневая – путем решения линейной краевой задачи для стержня. На этой основе предлагается находить корректирующий коэффициент для момента инерции стержня при изгибе.

Проведены вычислительные и натурные эксперименты, подтверждающие правомерность такого подхода.

Подобная методика может быть эффективно применена при оптимизации и анализе чувствительности мачт, когда конечно-элементные программные комплексы используются только для построение эквивалентных стержневых моделей и апостериорной оценки полученных проектов. При этом все оптимизационные процедуры проводятся в рамках стержневой модели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дривинг А.Я. Устойчивость мачт на оттяжках. – М.: Издательство литературы по строительству, 1964. - 112 с.
2. Перельмутер А.В. Расчет мачт на оттяжках. – Киев: SCAD Office, 2004. - 47с.
3. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components / British Standards BTI. – London, 2006. – 36с.
4. Гринев В.Б., Яровой Ю.Н., Алешечкина Т.А., Виноградов В. В., Левада В.А. Об одной модельной задаче оптимизации мачт мобильной связи. – Харьков: Материалы IV международной научно-

- технической интернет конференции, 2014. – с. 138-142.
5. Савицкий Г.А. Основы расчета радиомачт. М.: Государственное издательство по вопросам связи и радио, 1953. – С. 93-111.
 6. Irwin. H.P.A.H. The Design of spires for wind simulation / Irwin. H.P.A.H.// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 7 (1981). – S. 361–366.
 7. Donatas Jatulis. Masts with combined guys: analysis and control of stress and deformation: summary of Doctoral Dissertation technological Sciences, Civil. Engineering (OT2) / Donatas Jatulis. – Vilnius, 2008. – 22с.
 8. Гринев В.Б., Алешечкина Т.Н. Расчет одномерных элементов конструкций. – Харьков: Издательство Иванченко И.С., 2013. – 177с.

Рецензент: д-р техн. наук В.В. Фурсов