

КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ ВИТЯЖНОЇ ТРУБИ З КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ВІД ДІЇ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

С. М. Верещака, д.т.н., професор, Сумський державний університет

Д. О. Жигилій, к.т.н., ст. викладач, Сумський державний університет

В. В. Данильцев, інженер, Сумський державний університет

І. В. Верещака, ст. викладач, Сумський національний аграрний університет

В роботі пропонується розрахунки статичної та динамічної міцності витяжної труби, виконаної зі склопластику. Деформаційна модель матеріалу вважається квазіоднорідною, складеною з різноорієнтованих односпрямованих шарів. Вітрові навантаження на витяжну трубу моделюються на підставі державних стандартів. Розрахункова модель представлена трансверсально ізотропною циліндричною оболонкою зі змінною товщиною по висоті, підкріпленою розтяжками у вигляді сталевих канатів. Надано висновок щодо міцності конструкції від дії статичних та динамічних навантажень. Проаналізовано вплив розтяжок, встановлених на різних рівнях по висоті труби, на міцність, жорсткість та власні частоти коливань розглянутої конструкції.

Ключові слова: витяжна труба, статична та динамічна міцність, вітрові навантаження, склопластик.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Останнім часом актуалізувалася проблема заміни або модернізації систем теплопостачання. І якщо проста заміна трубопроводів дає можливість використання старих інженерних рішень, то модернізація часто зумовлена приєднанням додаткового обладнання, наприклад групового утилізатора тепла, що знижує температуру димових газів нижче точки роси і зумовлює хімічну руйнацію внутрішніх поверхонь сталевих витяжних труб. Тому доцільним є використання корозійно стійких матеріалів, якими є склопластики, для газопроводів та витяжних труб. Особливістю склопластиків є анізотропія пружних властивостей з порівняно низькими модулями пружності в певних напрямках. Це суттєво знижує власні частоти коливання конструкції і зумовлює розв'язання низки задач такого типу з врахуванням як вітрового тиску, так і впливу його пульсаційної складової.

Під час розрахунків будівельних споруд на дію вітрового навантаження застосовується державні норми проектування ДНіП 2.01.07-85 та їх більш смачні перевидання [1], [2], які дещо відрізняються за вимогами.

Ключовою відмінністю є норми по врахування динамічного характеру вітрового навантаження. У [1] розрахункове значення вітрового тиску серед іншого помножується на коефіцієнт динамічності C_d , який враховує вплив пульсаційної складової вітрового навантаження і просторову кореляцію вітрового тиску на споруду. Для основних типів будівель і споруд значення C_d визначаються приведеними в нормах графіками на рисунку. Зазначені на рис. 1 ширина і діаметр прийняті в перерізі, перпендикулярному до вітрового потоку. Значення C_d знаходяться в межах від 0,9 до 1,2. Тобто задача розв'язується у квазістатичній постановці. Для споруди вибірково малої

жорсткості це неприпустимо без додаткового дослідження. Норми [2] зберігають початковий підхід вихідного документа і є більш виправданими при аналізі динаміки роботи димаря зі склопластику.

Під час виготовлення і експлуатації багатошарових конструкцій з композиційних матеріалів на міжшарових поверхнях контакту жорстких армованих шарів відбувається утворення тонкого м'якого клейового прошарку, а також різного роду структурних недосконалостей, наприклад, ділянок непроклея або відшарувань. Традиційно використовуване в розрахункових моделях припущення про безперервність переміщень і напружень при переході через поверхню контакту жорстких армованих шарів виявляється істотно порушеним. У цьому зв'язку вивчення напруженого стану армованих оболонок при дії як статичного, так і динамічного навантаження на основі дискретно-структурної теорії багатошарових оболонок, коли враховуються реальні умови взаємодії шарів і величина зміни контактних напружень на міжшарових поверхнях, є актуальним завданням. Докладний аналіз останніх результатів і напрямків розвитку дискретно-структурної теорії шаруватих пластин і оболонок можна знайти в оглядах робіт [3 – 4].

Мета статті. Показати доцільність використання склопластику в якості матеріалу витяжних труб. Проаналізувати переваги і недоліки різних конструкцій підкріплюючих елементів у вигляді розтяжок-канатів. Надати висновок щодо міцності конструкції від дії статичних та динамічних навантажень і проаналізувати вплив підкріплюючих елементів на міцність, жорсткість та власні частоти коливань конструкції.

Постановка проблеми. Композити багатошарової структури широко використовуються в різних областях сучасної техніки. Відомо, що

елементи з композитів значно виграють по питомій міцності при порівнянні з їхніми ізотропними аналогами. Так, наприклад, заміна сталевих труб склопластиковими збільшує термін використання трубопроводів, приблизно в 3 рази зменшує його вагу, а також виключає застосування антикорозійних захисних засобів і дорогих зварювальних робіт.

Для практичної реалізації переваг витяжних труб зі склопластику у порівнянні з їх сталевими аналогами необхідно і далі накопичувати досвід проектування таких конструкцій. Під час конструювання і розрахунків на міцність склопластикових витяжних труб виникають питання, які на цей час не висвітлені в технічній літературі. До таких питань можна віднести розрахунок зазначеної конструкції від дії пульсаційної складової вітрового навантаження. Додатковою проблемою стають задачі статичної та динамічної міцності з'єднань секцій у вигляді циліндричної оболонки між собою в єдину витяжну трубу та підкріплюючих елементів (тросів, фланців, тощо), резонансних збуджень від пульсації вітру, що вимагає розв'язання задачі аеропружності чисельно або модельного експерименту на витяжній трубі, аеродинамічних нестійких коливань та інших навантажень.

1. Розрахунок витяжної труби

Вважається, що склопластик є трансверсально ізотропним матеріалом з коефіцієнтом анізотропії 1,5 (відношення армуючого матеріалу, покладеного в коловому напрямку до армуючого матеріалу, покладеного в поздовжньому напрямку). У даному трубопроводі використовується склопластикова труба виготовлена методом косошарового поздовжньо-поперечного намотування. Аналітично визначалися пружні сталі за методикою теорії шаруватих композиційних матеріалів [4, 5]. При цьому вважалось, що виконується припущення про ідеальний контакт суміжних шарів. Кількість шарів дорівнювала 16 з кодом армування $[(0^\circ / 90^\circ)_4]_s$. Допустимі нормальні напруження склопластику становлять $[\sigma] = 150 \text{ МПа}$. Пружні сталі приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Пружні сталі* склопластикового циліндра.

E_{ij} , МПа	G_{ij} , МПа	ν_{ij}
$E_\theta = 15000$	$G_{zr} = 1715$	$\nu_{zr} = 0,242$
$E_z = 15000$	$G_{\theta r} = 1715$	$\nu_{\theta r} = 0,242$
$E_r = 4100$	$G_{\theta z} = 6039$	$\nu_{\theta z} = 0,12$

θ – коловий напрям, z – осьовий напрям, R – радіальний напрям в циліндричній системі координат з віссю z вздовж вісі східчастого циліндра.

На рис. 1 показана вихідна схема трубопроводу з окремих секцій склопластикових труб, які з'єднані між собою сталевими фланцями або склопластиковими бандажками. Розрахункова модель витяжної труби є трансверсально

ізотропна циліндрична оболонка з розтяжками у вигляді сталевих канатів (канат 16,5-Г-1-ОЖ-Н-1370 ГОСТ 2688-80, розрахункова площа всіх дротів $104,61 \text{ мм}^2$, модуль Юнга 1-го роду $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$). Розглянута труба жорстко затиснена в основі. До бокової грані прикладено рівномірно розподілене змінне по висоті та за часом вітрове навантаження. Розрахункова модель моделюється в програмному комплексі ANSYS.

Нормативне значення зовнішнього навантаження [2] визначалося як сума середнього значення вітрового тиску та динамічної складової від пульсації вітру:

$$w = w_m + w_p. \quad (1)$$

Нормативне значення середньої складової вітрового навантаження в залежності від еквівалентної висоти z_e , що для труб складає висоту над рівнем землі $z_e = z$, визначалося за формулою

$$w_m(z) = w_0 \cdot k(z_e) \cdot c = 380 \cdot 0,65 \cdot (z/10)^{2 \cdot 0,20} \cdot 1 = 247 \cdot (z/10)^{0,4} \text{ Па}, \quad (2)$$

де w_0 – нормативне значення вітрового тиску, для України (II та III вітровий район) $w_0 = 0,30 \div 0,38 \text{ кПа}$; $k(z_e)$ – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску для висоти, для місцевості типу В (міські території, лісові масиви та інші місцевості, що рівномірно вкриті перешкодами заввишки більше ніж 10м) $k(z_e) = k_{10} \cdot (z_e/10)^{2\alpha} = 0,65 \cdot (z/10)^{2 \cdot 0,20}$; $c = 1$ – аеродинамічний коефіцієнт лобового опору призматичної споруди, який визначається в залежності від відносного подовження споруди $\lambda_e = 2 \cdot \lambda = 2 \cdot l/d = 2 \cdot 60/0,6 = 200$ відповідно до [2, с.64 – 68].

Нормативне значення пульсаційної складової вітрового навантаження на еквівалентній висоті визначалося

$$w_p(z) = w_m \cdot \xi \cdot \zeta(z_e) \cdot \nu = 247 \cdot (z/10)^{0,4} \cdot 1,4 \cdot 1,06 \cdot (z/10)^{-0,20} \cdot 0,8 \approx 293 \cdot (z/10)^{-0,20} \text{ Па}, \quad (3)$$

де $\zeta(z_e)$ – коефіцієнт пульсації тиску вітру для місцевості типу В (міські території, лісові масиви та інші місцини, що рівномірно вкриті перешкодами заввишки більше ніж 10м) $\zeta(z_e) = \zeta_{10} \cdot (z_e/10)^{-\alpha} = 1,06 \cdot (z/10)^{-0,20}$; ν – коефіцієнт просторової кореляції пульсацій тиску вітру $\nu \approx 0,80$; $\xi = 1,4$. Всі коефіцієнти рівняння (3) визначені відповідно до будівельних норм [2, с.21 – 23].

Граничне значення частоти власних коливань становить $f_1 = 3,4 \div 3,8 \text{ Гц}$ для II та III вітрових зон відповідно [2, с.22], якщо логарифмічний декремент коливань становить $\delta = 0,15$. Всі форми власних коливань з частотами меншими за граничну частоту доведеться врахувати у подальших розрахунках.

Варіюючи жорсткістю розтяжок, можна зробити висновок, що жорсткість розтяжок несуттєво впливає на власні частоти згинальних коливань східчастої витяжної труби.

Для зниження першої власної частоти треба збільшувати кількість канатів. З таблиці 2 випливає, що конструктивно обґрунтовано

застосування схеми витяжної труби з 3 групами приєднань канатів, що дозволяє враховувати лише перші 3 форми власних коливань.

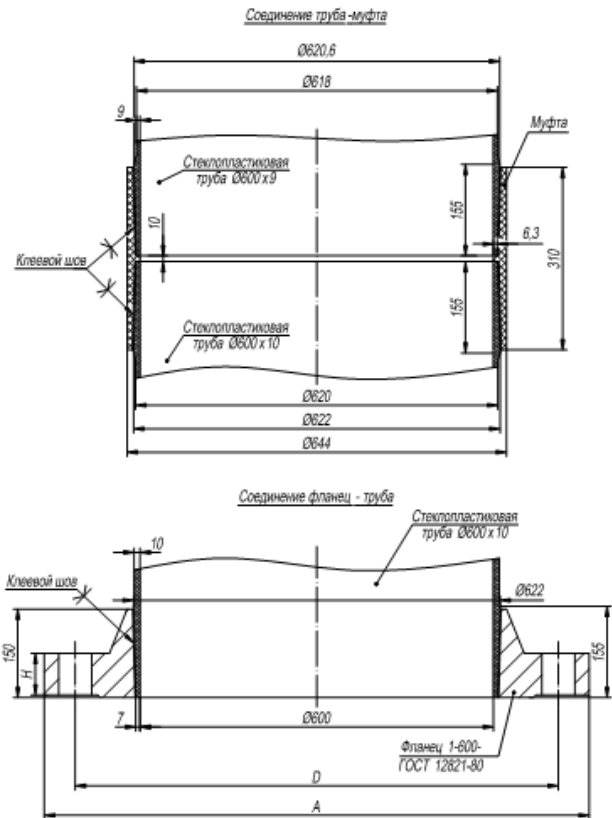
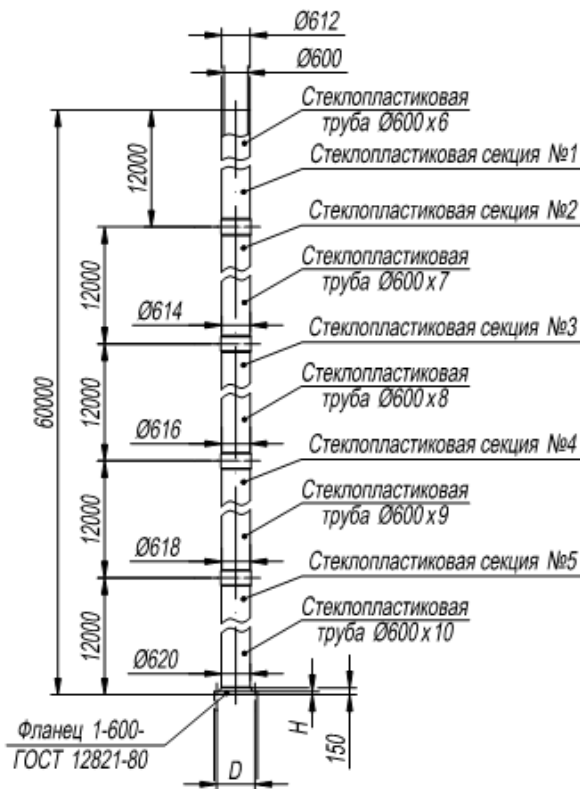


Рисунок 1 – Схема витяжної труби

Таблиця 2– Вплив кількості розтяжок на власні частоти коливання конструкції

Кількість груп розтяжок	ν_1 , Гц	ν_2 , Гц	ν_3 , Гц	ν_4 , Гц	ν_5 , Гц
1	0,570	1,263	1,895	3,451	5,260
2	1,209	1,292	3,112	3,547	5,772
3	1,276	2,518	3,328	4,253	6,209
4	2,518	2,780	3,524	4,443	6,353
5	2,778	3,523	4,257	4,995	6,978

(Розрахункова площа перерізу всіх встановлених розтяжок 104,61 мм²)

У якості розрахункової схеми витяжної труби, яка зазнає вимушені коливання від пульсації вітру, розглянута східчаста консоль зі змінними геометричними характеристиками перерізів по висоті (рис. 1). Консоль одним кінцем затиснена і підкріплена трьома групами розтяжок, що працюють виключно на розтягання

Консоль навантажена послідовно сукупністю силових факторів: статично – власною вагою (додана маса конструкції 40 кг/м довжини), та нормативним значенням середньої складової вітрового навантаження (нелінійно розподілене навантаження інтенсивністю $q_m(z)=w_m(z) \cdot d_{zm}$), та нормативним значенням пульсаційної складової вітрового навантаження (нелінійно розподілене навантаження інтенсивністю $q_p(z)=w_p(z) \cdot d_{zm}$). Вітрові навантаження прикладені в площинах форм власних коливань. Внаслідок наявності трьох площин симетрії витяжної труби та розтяжок, розглядається лише одна площа з власними формами вимушених коливань.

Сукупна дія зусиль при врахуванні динамічної реакції за s власними формами визначається за формулою [2. с.21]:

$$X^2 = \sum_s X_i^2,$$

де X_i – зусилля за i формою коливання.,

Тому сумарний динамічний згинальний момент знаходиться, як $M_p = \sqrt{M_{v1}^2 + M_{v2}^2 + M_{v3}^2}$.

Максимальною сумою модулів згинальних моментів під дією статично прикладеної середньої складової вітрового навантаження тасумарного динамічного згинального моменту (рис. 3) є $M_{max} \approx 95447 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що діє на секції №2 (рис. 1). У цьому перерізі також діє повздовжня сила $N = -13488 \text{ Н}$ (рис. 2).

Умова міцності для нормального перерізу секції №2 за нормальними напруженнями:

$$\sigma = \frac{|M_{\max}|}{W} + \frac{|N|}{A} = \frac{32 \cdot 95447 \cdot 0,614}{\pi \cdot (0,614^4 - 0,6^4)} + \frac{4 \cdot 13488}{\pi \cdot (0,614^2 - 0,6^2)} \approx 4,867 \cdot 10^7 \text{ Па} \approx 48,67 \text{ МПа} \leq 150 \text{ МПа}$$

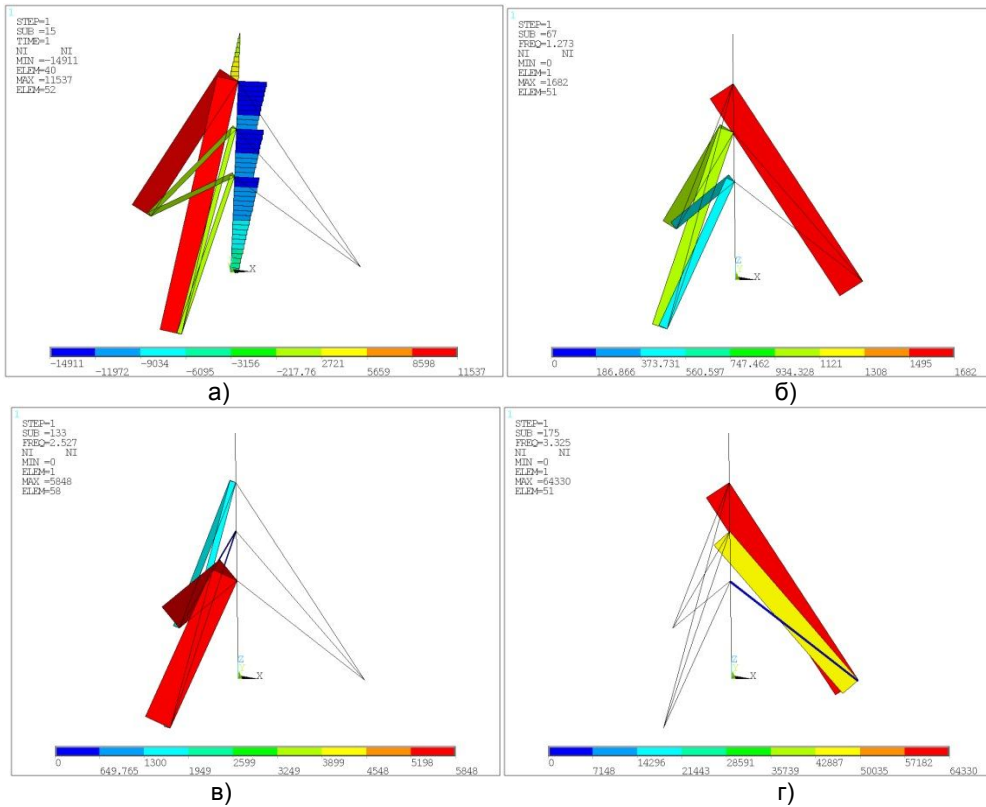


Рисунок 2 – Епюри повздожніх сил N, Н :

а) під дією статично прикладеної середньої складової вітрового навантаження q_m , Н/м; та під дією динамічно прикладеної пульсаційної складової вітрового навантаження $q(t)$, прикладеного з частотою б) $\nu_1=1,273$ Гц; в) $\nu_2=2,527$ Гц; г) $\nu_3=3,325$ Гц

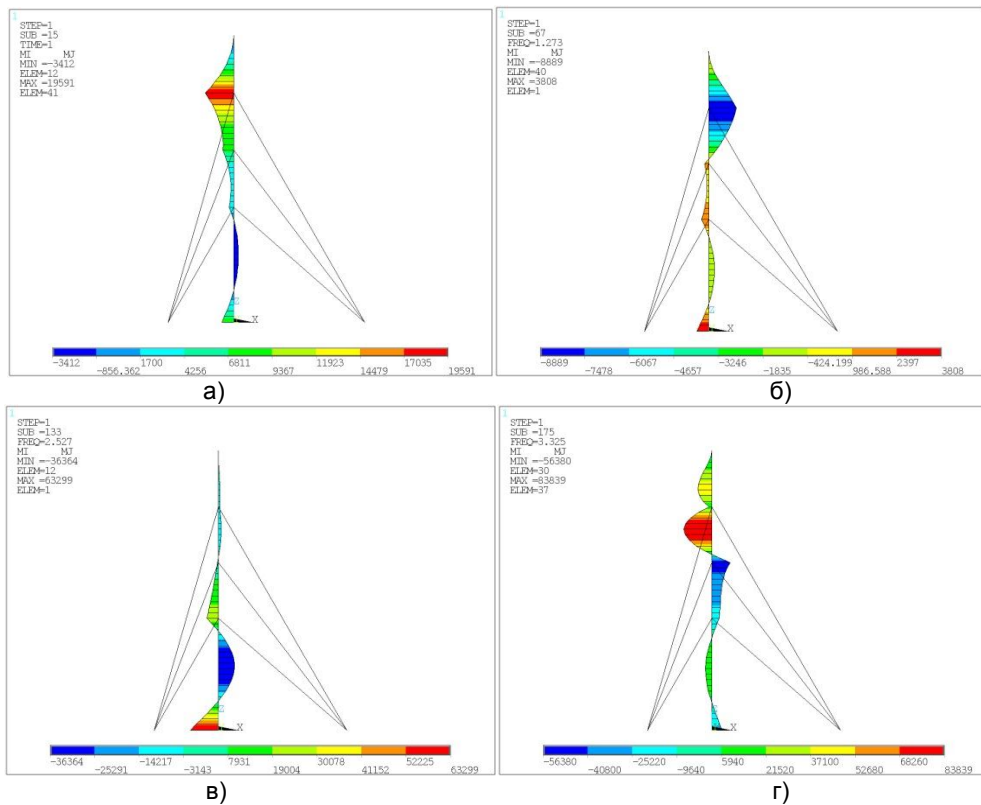


Рисунок 3 – Епюри згинальних моментів M, Н·м:

а) під дією статично прикладеної середньої складової вітрового навантаження q_m , Н/м;
та під дією динамічно прикладеної пульсаційної складової вітрового навантаження $q(t)$,
прикладеного з частотою б) $v_1=1,273$ Гц; в) $v_2=2,527$ Гц; г) $v_3=3,325$ Гц.

Висновки. В даній роботі за допомогою програмного комплексу ANSYS визначені частоти та форми власних коливань витяжної склопластикової труби. Проведений аналіз напружено-деформованого стану розглянутої конструкції доводить суттєвий вплив на її частоти та форми власних коливань кількості груп розтяжок, встановлених на різних рівнях по висоті труби. Вибрана раціональна форма кріплення розтяжок і показано, що представлена конструкція близька до раціональної за міцністю.

Список використаної літератури:

1. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования Введено: «ИМЦ» (г. Киев, ул. М. Кривоноса, 2а; т/ф. 249-34 -04). Введено в действие с 1 января 2007. – Киев: Минстрой Украины, – 2006. – с.78.
2. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. (Актуализированная редакция) / Свод правил СП 20.13330.2011. – М.: Министерство регионального развития Российской федерации, 2011. – 80 с.
3. Верещака С. М. Нелинейное деформирование и устойчивость многослойных элементов конструкций с дефектами структуры / С. М. Верещака – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 286 с.
4. Верещака С. М. Упругие постоянные и обобщенные характеристики жесткости материала слоистой структуры / С. М. Верещака // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Тематический выпуск: Динамика и прочность машин.– Харьков: НТУ “ХПИ”.– 2008. – №36. – С. 29 – 40.
5. Верещака С.М., Караш И.Т., Жигилий Д.А., Дейнека А.В. Исследование механических свойств стеклопластикового цилиндра с межслойными дефектами структуры/Верещака С.М., Караш И.Т., Жигилий Д.А., Дейнека А.В.// Компрессорное и энергетическое машиностроение – 2012. – №3(29). – С.32-34.

Верещака С.М., Жигилий Д.А., Данильцев В.В., Верещака И.В. Конструкционная прочность вытяжной трубы из композиционных материалов при действии ветровой нагрузки

В работе предлагается расчеты статической и динамической прочности стеклопластиковой вытяжной трубы. Деформационная модель материала считается квазиоднородной, составленной из разно ориентированных однонаправленных слоев. Ветровые нагрузки на вытяжную трубу моделируются на основании государственных стандартов. Расчетная модель представлена трансверсально изотропной цилиндрической оболочкой переменной толщины по высоте, подкрепленной растяжками в виде стальных канатов.

С помощью программного комплекса ANSYS определены частоты и формы собственных колебаний вытяжной стеклопластиковой трубы. Дан анализ напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции от действия заданных статических и динамических нагрузок, а также количественная оценка влияния способа установки растяжек на прочность, жесткость и собственные частоты колебаний рассматриваемой конструкции. Доказано, что частоты и формы собственных колебаний трубы зависят от количества растяжек, установленных на разных уровнях по высоте трубы. Выбрана рациональная форма крепления растяжек и показано, что представленная конструкция близка к рациональной по условиям прочности.

Ключевые слова: *вытяжная труба, статическая и динамическая прочность, ветровые нагрузки, стеклопластик..*

Vereshchaka S.M., Zhigiliy D.O., Danilcev V.V., Vereshchaka I.V. Wind loaded composite flue structural integrity

In the paper, the calculations of static and dynamic strength fiberglass exhaust pipe. The deformation model of the material is considered to be quasi-homogeneous, made up of different orientated unidirectional layers. Wind loads on exhaust pipe are modeled on the basis of state standards. The estimated model is represented by a transversely isotropic cylindrical shell of variable thickness in height, supported by stretch marks in the form of steel ropes.

With the help of ANSYS software identifies frequencies and forms of natural vibrations fiberglass exhaust pipe. The analysis of stress-strain state of the studied structures from the action of the specified static and dynamic loads, as well as to quantify the effect of the stretch on the strength, stiffness and natural frequency of the structure in question. It is proved that the frequencies and forms of natural vibrations of the pipe depend on the number of stretch marks that are installed at different levels along the height of the pipe. Selected rational form of fastening stretch marks and it is shown that the presented design is similar to the rational for strength conditions.

Keywords: *flue; static and dynamic strength, wind loading; glass/epoxy composite.*

Стаття надійшла в редакцію: 12.03.2015 р.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Кузема О.С.