



Каждый опыт должен проводиться для серии образцов. Учитывая, что в форму можно залить одновременно 3 образца и при этом наибольшее и наименьшее опытные значения предела прочности нужно исключить из рассмотрения, логично для каждой серии заливать 6 образцов.

Результаты  $N$  проведенных опытов позволяют выбрать модель, то есть вид функции отклика  $y = f(x_1, \dots, x_k)$  и записать ее уравнение. Если число факторов равно двум, функцию отклика удобно представить в геометрической форме, т.е. показать поверхность отклика. При составлении регрессии (уравнения этой поверхности) наиболее часто останавливаются на полиномиальных моделях 2-й степени вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

Увеличивая степень, можно задать аппроксимацию любой степени точности, однако на практике повышение степени полинома влечет значительное увеличение необходимого числа опытов и редко существенно повышает точность.

**УДК 624.012.:004**

М.В. Павлюченков, інженер

Український державний університет залізничного транспорту

### **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

На сьогоднішній день існує величезний попит на нафтопродукти в усьому світі. Найбільш цінними видами палива є бензин, керосин та ін. Для їх транспортування на залізничному транспорті застосовуються вагони-цистерни для перевезення світлих нафтопродуктів. Умови експлуатації транспортних засобів пред'являють підвищені вимоги до міцності існуючих і нових конструкцій цистерн. Роботи по прогнозуванню, усуненню слабких місць і продовженню терміну служби резервуарних вагонів повинні виконуватися з урахуванням нових досягнень в області дослідження міцності, безвідмовності і довговічності. Внесенням конструктивних змін, які спрямовані на перерозподіл навантажень і

напружень у небезпечних зонах може бути досягнутий ефект зниження максимальних напружень, а за рахунок цього і зниження металоємності.

Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) цистерни була створена комп'ютерна модель.

Котел цистерни створено шляхом обертання твірної відносно осі, що проходить через центри днищ. Люк котла створено циліндричною поверхнею, кришка люка – кругла пластинка. Отвір для зливного приладу виконано обертанням твірної навколо осі, яка проходить посередині котла цистерни у вертикальній площині.

Для розрахунку пологих оболонок відома серія простих пластинчастих чотирикутних скінченних елементів. Однак за допомогою таких елементів не вдається описати геометрію конструкції складного обрису. В цьому випадку застосовуються трикутні елементи. Використання трикутних елементів дозволяє добре описувати геометрію конструкції зі складним контуром. Тому для побудови розрахункової моделі в вершинах днищ і кришки люка, в місцях з'єднання люка і отвору для зливного приладу з оболонкою котла необхідно застосовувати трикутні скінченні елементи.

У всіх основних елементах рами помітно, що товщина елемента у багато разів менше його основних геометричних розмірів, тому доцільно несучі частини рами моделювати з плоских скінченних елементів. Отже, всі балки рами, консольні опори і середні лапи виконані з листів, товщина яких відповідає геометричним розмірам елементів. Дерев'яні бруси крайніх опор представлені у вигляді восьмикутних об'ємних елементів. У місцях перетину і з'єднання складових частин рами використовуються трикутні скінченні елементи.

У місцях обпирання котла на дерев'яні бруси введені двовузлові скінченні елементи: одностороннього лінійного зв'язку, для моделювання вільного переміщення котла відносно брусів в площині перпендикулярній до твірної; односторонній елемент тертя, для ковзання котла уздовж твірної. При цьому в місці, де поверхні торкаються, і між якими з'являється тертя, для всіх вузлів попарно застосовується об'єднання переміщень по всіх напрямках, крім того напрямку в якому відбувається ковзання.

Розрахункова схема по методу скінченних елементів отримана шляхом розбиття моделі на об'ємні восьмивузлові, двовузлові пластинчасті чотирикутні і трикутні скінченні елементи. В результаті такого розбиття було отримано 86174 елементів і 82479 вузлів.

При розрахунку на статичні та ударні навантаження використовується програмний комплекс «Ліра».

Проведення оцінки НДС вагона-цистерни, при виникненні в котлі гідравлічного удару, можна застосувати відому із гідростатики взаємодію між тиском  $p$  рідини та відстанню від її вільної поверхні до точки, яка розглядається з урахуванням прискорення вагона. Для перевірки

адекватності приведеної методики результати розрахунку на моделі порівнювались з експериментальними значеннями статичних випробувань на міцність, гідравлічних випробувань котла, випробувань на міцність при співударі, ходових динамічних і ходових міцнісних випробувань вагона-цистерни для перевезення світлих нафтопродуктів моделі 15-957, які проведені ВЦ ПВ УкрНДІВ. Значення похибки між отриманими результатами на моделі та експериментальними не перевищує 10-12 %.

Особливістю конструкції рам цистерн являється те, що їх поздовжні балки майже не беруть участь в сприйнятті основних вертикальних навантажень. Це пояснюється великою жорсткістю котла в порівнянні з жорсткістю поздовжніх балок рами, внаслідок чого майже усе навантаження від котла передається на крайні його опори, а від останніх на візки.

Контактний тиск від опорного пристрою на оболонку безпосередньо залежить від зміни жорсткості опори в радіальному напрямку. У більш жорсткішій опорі відбувається «відрив» оболонки в середній частині і тому навантаження переміщується до кінців опори в радіальному напрямку. Жорсткість (контактний тиск) опорного пристрою повинна зменшуватись від середини до кінців в радіальному напрямку.

Для вирішення поставленої задачі виконано дослідження для пошуку оптимальної конструкції опорного пристрою. На першому етапі зроблено патентно-бібліографічний аналіз технічних рішень, виявлено переваги і недоліки та запропоновано нові варіанти конструкцій, визначено найбільш ефективнішу конструкцію. На наступному етапі для визначення її оптимальних параметрів складено функцію цілі, введені обмеження; отримано апроксимацію функцій цілі та обмежень у вигляді поліномів. На третьому етапі запропоновано чисельну реалізацію оптимізації функції та визначено оптимальні параметри конструкції графічним методом. Результати методів співпали.

Вище зазначено, що жорсткість підкріплюючого елемента повинна плавно знижуватися від середини до своїх кінців. У зв'язку з цим, проведено деформаційний аналіз конструктивних варіантів, конкретно порівнювалися існуюча конструкція та найбільш ефективніша конструкція по аналізу напруженого стану.

По результатам розрахунків побудована залежність прогинів точок опорного пристрою в зоні контакту з оболонкою від місця їх розташування в коловому напрямку. З аналізу отриманих даних видно, що в середній частині обидва опорних пристрої мають приблизно однакову жорсткість, а ближче до кінців конструкція, що пропонується, має більшу піддатливість, тобто жорсткість зменшується.

Для визначення закону розподілу опорного тиску від опорного пристрою на котел цистерни проведено зміни в розрахунковій скінченно-елементній моделі вагона-цистерни. В зонах контакту оболонки з

опорними брусками між ними введенні двохвузлові стержневі скінченні елементи. При розрахунку моделі вагона-цистерни отримані значення повздовжніх зусиль в стержневих елементах, на основі яких побудовані залежності зусиль в стержнях від місця їх розташування в коловому напрямку. Визначено закон розподілу опорного тиску в середній частині опорного пристрою в напрямку твірної котла цистерни. Показано закони зміни жорсткостей в радіальному напрямку та закони зміни контактного тиску. В запропонованому варіанті вони більше зменшуються до своїх кінців, що позитивно впливає на НДС котла цистерни. Конструкція з запропонованим удосконаленням перевірена на спектр навантажень згідно з нормативними документами.

#### УДК 1174

Дубровський О.А., студент групи 401-БП,  
Каюрін А.С., студент групи 401-БП  
Керівник – Нестеренко М.П., д.т.н., професор  
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

### **ДОСВІД ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ВИЩОЇ КВАЛІФІКАЦІЇ БУДІВНИЦТВА В БІЛОСТОЦЬКІЙ ПОЛІТЕХНІЦІ**

Важливим є вивчення методик підготовки спеціалістів у різних куточках світу і залучення світового досвіду для підготовки майбутніх інженерів-будівельників в Україні. Польща є країною з високим рівнем освіти і науки, в якій підготовка інженерів-будівельників займає провідну роль. Польща залучає найсучасніші технології, активно використовуються ресурси, які надає Європейський Союз.

Метою роботи є демонстрація підготовки інженерів-будівельників у Польщі, показ конкретних прикладів на основі вивчених предметів, ознайомлення з методикою викладання у польських вузах та системою освіти загалом. Дванадцяти студентам будівельного факультету випала нагода поїхати на навчання на один семестр у Польщу, до міста Білосток, в Білостоцьку політехніку за програмою подвійного дипломування.

Білостоцька Політехніка має 65-и річну історію, близько 12 тисяч студентів і більше ніж 600 викладачів. В Політехніці 7 факультетів: архітектурний, будівництва та оточуючої середовища, електричний, інформатики, механіки (мехатроніки), менеджменту, лісничий.

Для суміщення навчальних програм, між нашими двома університетами був заключений «Learning Agreement», де предмети, які вивчаються в нашому університеті, були замінені на наступні курси:

- Composite structures (Сталезалізобетонні конструкції);
- Concrete for special applications (Бетони для спеціальних задач);