



II міжнародна науково-технічна конференція «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні»

«МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕРУЙНІВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ»

М.В. Марчук^{1,2}, д-р фіз.-мат. наук, проф.

Б.Д. Дробенко^{1,2}, д-р фіз.-мат. наук, пров. наук. співр.

В.М. Сіренко³, канд. техн. наук

Д.В. Клименко³, канд. техн. наук

В.М. Харченко³

¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача
НАН України (Львів, Україна, mv_marchuk@ukr.net);

²Національний університет «Львівська політехніка
(Львів, Україна, mv_marchuk@ukr.net);

³Державне підприємство «Конструкторське бюро
«Південне» ім. М. К. Янгеля» (Дніпро, Україна, volod.kharchenko@meta.ua)

1. МАТЕМАТИЧНЕ Й КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ЯК ОСНОВА МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОНСТРУКЦІЮ З УРАХУВАННЯМ ДАНИХ НЕРУЙНІВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

При розрахунку міцності великогабаритних тонкостінних конструкцій, зокрема таких як бак окислювача першого ступеня, з точки зору попереднього досвіду та результатів виконаних числових досліджень необхідно враховувати такі характерні аспекти:

1. Значну малість параметра тонкостінності

$$\varepsilon = h/l \ll 1,$$

де

h – значення мінімальної товщини;

l – так званий характерний лінійний розмір тонкостінної конструкції.

У випадку конструкції бака окислювача першого ступеня маємо

$$\varepsilon \approx 10^{-5},$$

а застосування теорій оболонок, у т. ч. узагальнених та уточнених, при таких значеннях ε , як правило не гарантує достовірного результату при використанні числових методів, зокрема й методу скінченних елементів.

2. Значну складність геометрії будови лицевих поверхонь і наявність різного роду підкріплюючих елементів таких, як шпангоути та стрингери, а також зварних швів.

3. Пружно-пластичне деформування та суто пластичне при навантаженнях, близьких до руйнівних, що приводить до необхідності розв'язання нелінійних задач для систем диференціальних рівнянь в частинних похідних.

1.1. Характеристики математичних моделей конструкцій РКТ

Придатність математичної моделі для розв'язування задач дослідження характеризується тим, якою мірою вона володіє так

званими **цільовими** властивостями, основними з яких є **адекватність, стійкість і чутливість**.

1.2. Комп'ютерне моделювання.

Комп'ютерне моделювання – це процес відтворення поведінки об'єкта за допомогою комп'ютерної програми, що реалізує подання об'єкта у формі математичної моделі. Така програма називається комп'ютерною моделлю.

Результат комп'ютерного моделювання полягає в отриманні **кількісних і якісних** висновків щодо наявної моделі.

Кінцева мета комп'ютерного моделювання – **ухвалення рішення**, яке повинно бути вироблене на основі всебічного аналізу результатів моделювання. Основа вироблення рішення є порівняння результатів чисельного тестування й натурних експериментів.

Метод комп'ютерного моделювання є чисельним методом, і тому, як будь-який чисельний метод, він має істотний недолік – його результати завжди носять частковий характер, котрі відповідають певним значенням параметрів об'єкта.

Детальний аналіз поведінки об'єкта вимагає багаторазового моделювання процесу його функціонування шляхом варіювання вхідних даних моделі.

1.3. Числовий експеримент.

Суть числового експерименту полягає в дослідженні на комп'ютері математичних моделей чисельними методами.

Обчислювальний експеримент включає в себе наступні етапи:

- фізичний опис процесу, тобто з'ясування закономірності явищ, що протікають;
- розробка математичної моделі;
- алгоритм або метод розв'язання рівнянь;
- розробка програм;
- проведення розрахунків, аналіз результатів і оптимізація.

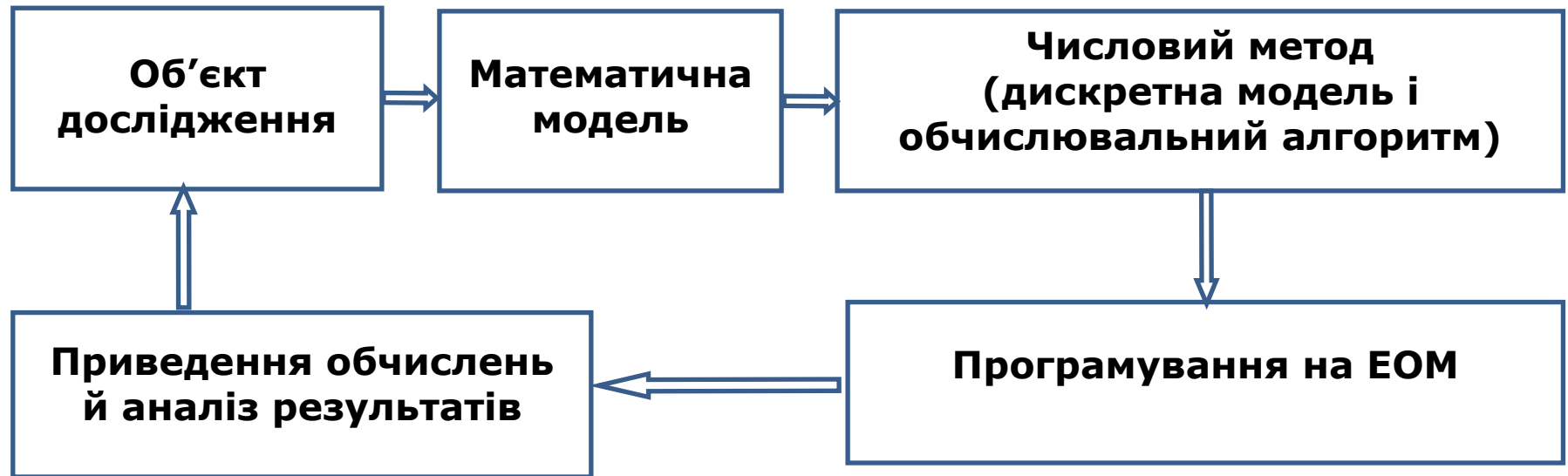


Рис. 1.1. Схема числового експерименту

1.4. Методологія визначення фактичних руйнівних навантажень на конструкцію бака окислювача





3

**Інформація про розміщення тензодавачів,
значення деформацій**



4

**Приведення вхідної інформації до
глобальної системи координат
розрахункової моделі**



5

**Порівняння розрахункових значень
деформацій з експериментальними даними
на всіх заданих етапах навантаження**



6

**Візуальне представлення порівняльних таблиць з
експериментальними та обчисленими значеннями
деформацій та їхні похибки у відсотках**





Рис. 1.2. Блок-схема методології

2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНОГО СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РАКЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА НЕРУЙНІВНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Співвідношення, що виражає умову рівноваги тіла
в момент часу $t = t + \Delta t$
(відповідно до принципу віртуальних переміщень)

$$\int_{t+\Delta t V}^{t+\Delta t} \tau_{ij} \delta_{t+\Delta t} \varepsilon_{ij} d^{t+\Delta t} V = {}^{t+\Delta t} R. \quad (2.1)$$

де

${}^{t+\Delta t} V$ - об'єм тіла в момент часу $t = t + \Delta t$;

${}^{t+\Delta t} \tau_{ij}$ - декартові компоненти тензора напружень Коші;

$\delta_{t+\Delta t} \varepsilon_{ij}$ - тензор деформацій, що відповідає віртуальним
переміщенням δu_i

$${}^{t+\Delta t}R = \int_{{}^{t+\Delta t}V} {}^{t+\Delta t}f_i^B \delta u_i d{}^{t+\Delta t}V + \int_{{}^{t+\Delta t}S_f} {}^{t+\Delta t}f_i^S \delta u_i^S d{}^{t+\Delta t}S. \quad (2.2)$$

Співвідношення між деформаціями і переміщеннями

$${}^t_0\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial {}^t_0 u_i}{\partial {}^0x_j} + \frac{\partial {}^t_0 u_j}{\partial {}^0x_i} + \frac{\partial {}^t_0 u_k}{\partial {}^0x_i} \frac{\partial {}^t_0 u_k}{\partial {}^0x_j} \right) \quad (2.3)$$

Зв'язок між компонентами тензорів Кірхгофа-Піоли II роду та Коші

$${}^t_0\sigma_{ij} = \frac{{}^0\rho}{{}^t\rho} \frac{\partial {}^0x_i}{\partial {}^tx_m} \frac{\partial {}^0x_j}{\partial {}^tx_n} \cdot {}^t\tau_{nm} \quad (2.4)$$

де 0x_i - координати точки тіла в момент часу $t=0$;

tx_i - координати точки тіла в момент часу t (${}^tx_i = {}^0x_i + {}^tu_i$);

${}^0\rho$, ${}^t\rho$ - густина тіла в конфігурації в початковий момент часу і в момент часу t .

Умова рівноваги відносно початкової конфігурації

$$\int_{0_V} {}^{t+\Delta t}_0 \sigma_{ij} \delta {}^{t+\Delta t}_0 \epsilon_{ij} d^0 V = {}^{t+\Delta t}_R \quad (2.5)$$

Умова рівноваги відносно деформованої конфігурації

$$\int_{t_V} {}^{t+\Delta t}_t \sigma_{ij} \delta {}^{t+\Delta t}_t \epsilon_{ij} d^0 V = {}^{t+\Delta t}_R \quad (2.6)$$

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

$$[\mathbf{K}] \mathbf{q} = \mathbf{R} - \mathbf{F} \quad (2.7)$$

$$[\mathbf{K}]^{(e)} = [{}^t_0 \mathbf{K}_L] + [{}^t_0 \mathbf{K}_{NL}] =$$

$$\int_{0_V} [{}^t_0 \tilde{\mathbf{B}}_L]^T [\mathbf{C}] [{}^t_0 \tilde{\mathbf{B}}_L] d^0 V + \int_{0_V} [{}^t_0 \tilde{\mathbf{B}}_{NL}]^T [{}^t_0 \mathbf{S}] [{}^t_0 \tilde{\mathbf{B}}_{NL}] d^0 V \quad (2.8)$$

$$\mathbf{F}^{(e)} = {}^t_0 \mathbf{F} = \int_{0_V} [{}^t_0 \tilde{\mathbf{B}}_L]^T {}^t_0 \hat{\mathbf{S}} d^0 V; \quad \mathbf{R}^{(e)} = \int_{0_V} [\mathbf{N}]^T \mathbf{f}^B d^0 V + \int_{0_S} [\mathbf{N}]^T \mathbf{f}^S d^0 S \quad (2.9)$$

$$[\mathbf{C}] = {}^{t+\Delta t}[\mathbf{G}] - \frac{\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\}^T {}^{t+\Delta t}[\mathbf{G}]^T {}^{t+\Delta t}[\mathbf{G}] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\}}{\frac{2}{3} k^t \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\}^T \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\}^T {}^{t+\Delta t}[\mathbf{G}] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2.10)$$

$$\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right\} = \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{11}}, \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{22}}, \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{33}}, \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{12}}, \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{13}}, \frac{\partial \Phi}{\partial {}^t_0 \sigma_{23}} \right\}^T$$

Умова Мізеса у випадку ізотропно-кінематичного зміцнення

$$\Phi({}^t_0 \sigma_{ij} - {}^t_0 o_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2} {}^t_0 s_{ij} {}^t_0 s_{ij}}, \quad s_{ij} = ({}^t_0 \sigma_{ij} - {}^t_0 o_{ij}) - \delta_{ij} \frac{1}{3} ({}^t_0 \sigma_{ij} - {}^t_0 o_{ij}). \quad (2.11)$$

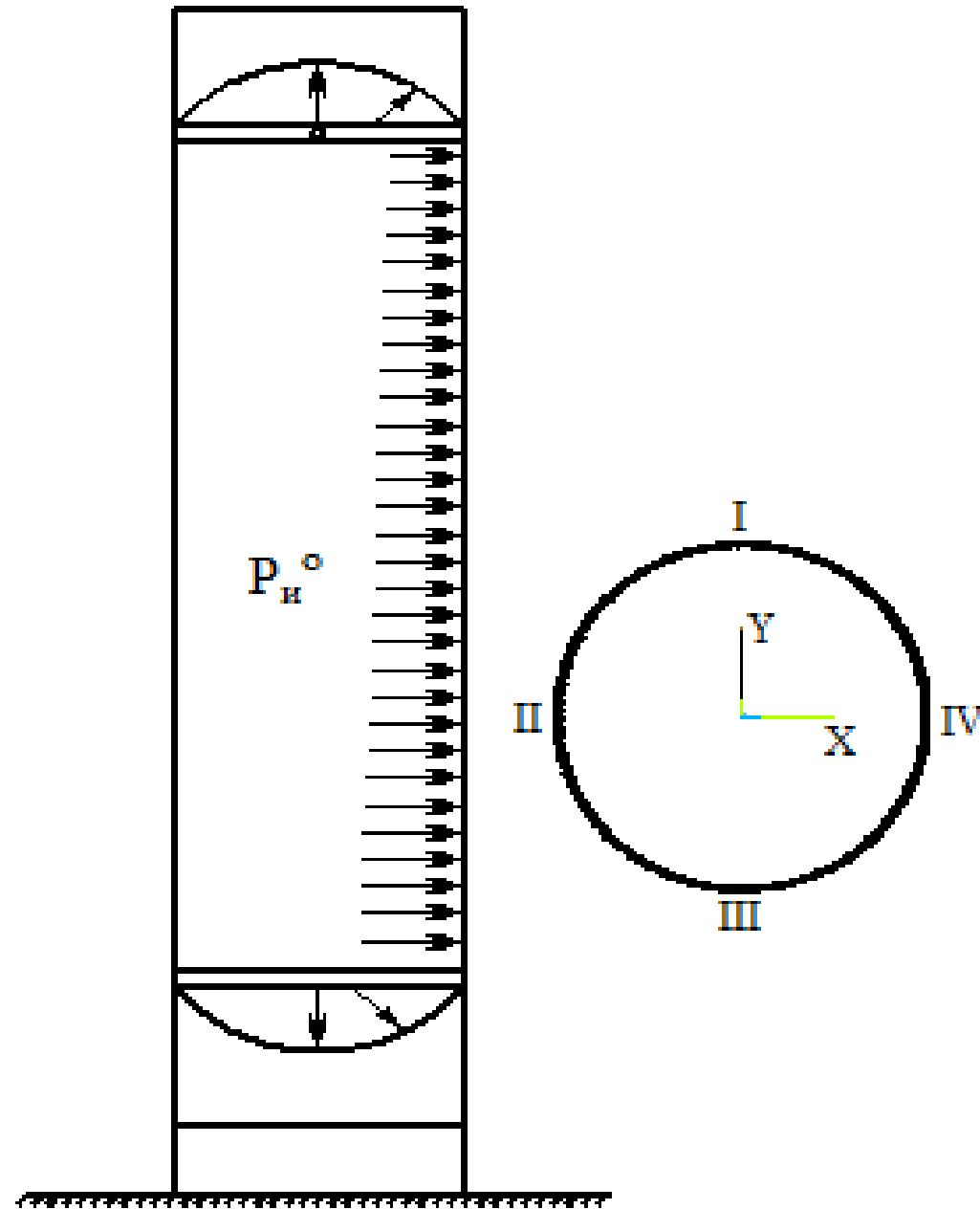


Рис. 2.1. Схема навантаження і система координат

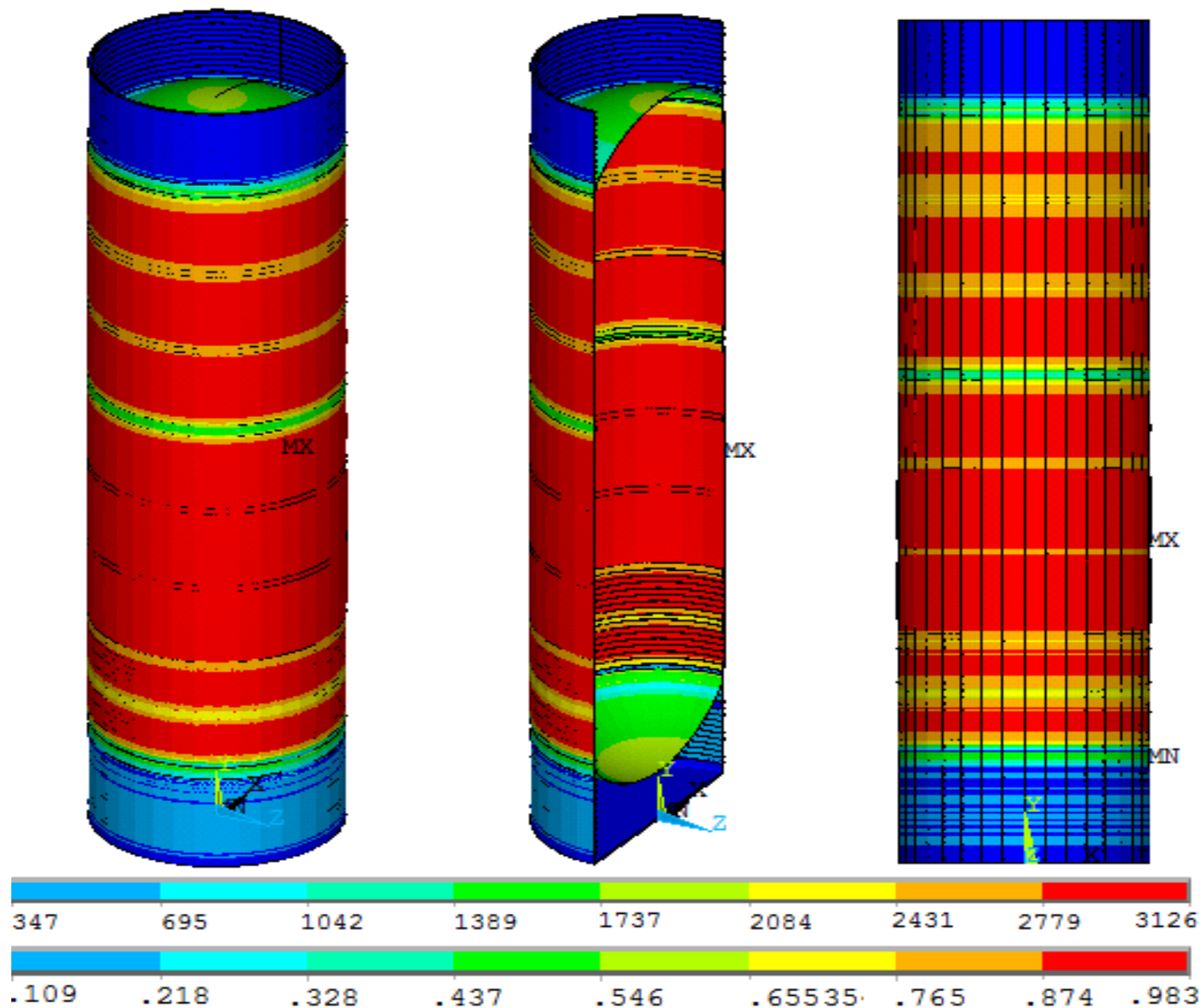


Рис. 2.2. Еквівалентні напруження за Мізесом та значення критерію максимальних напружень ($p=8.93 \text{ кг/см}^2$); $CR_TW=0.68$

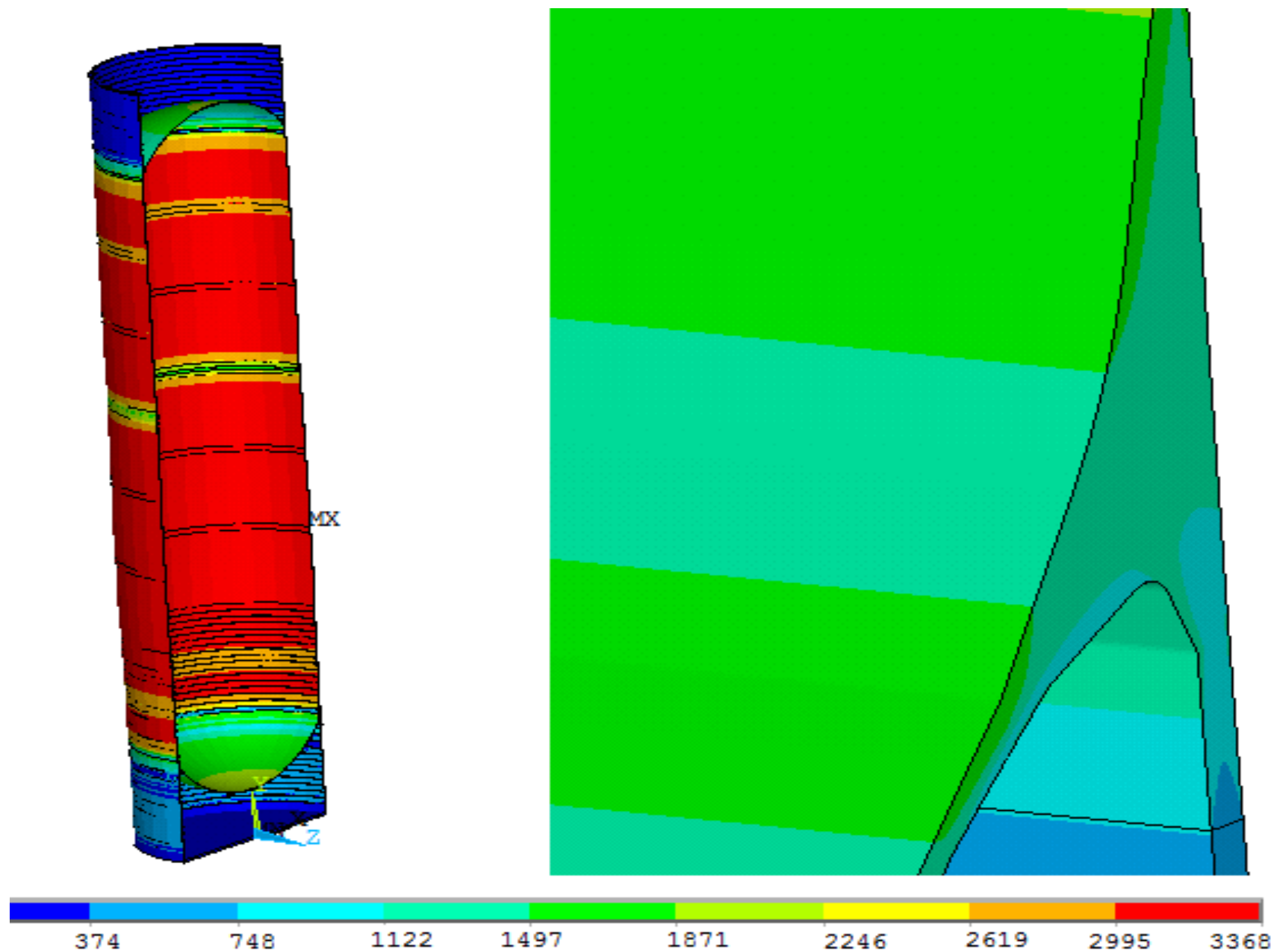


Рис. 2.3. Еквівалентні напруження в околі зони поєднання нижнього днища з циліндричною частиною бака ($p=9.5 \text{ кг/см}^2$); $Cr_Smax=1.08$; $CR_TW=0.79$

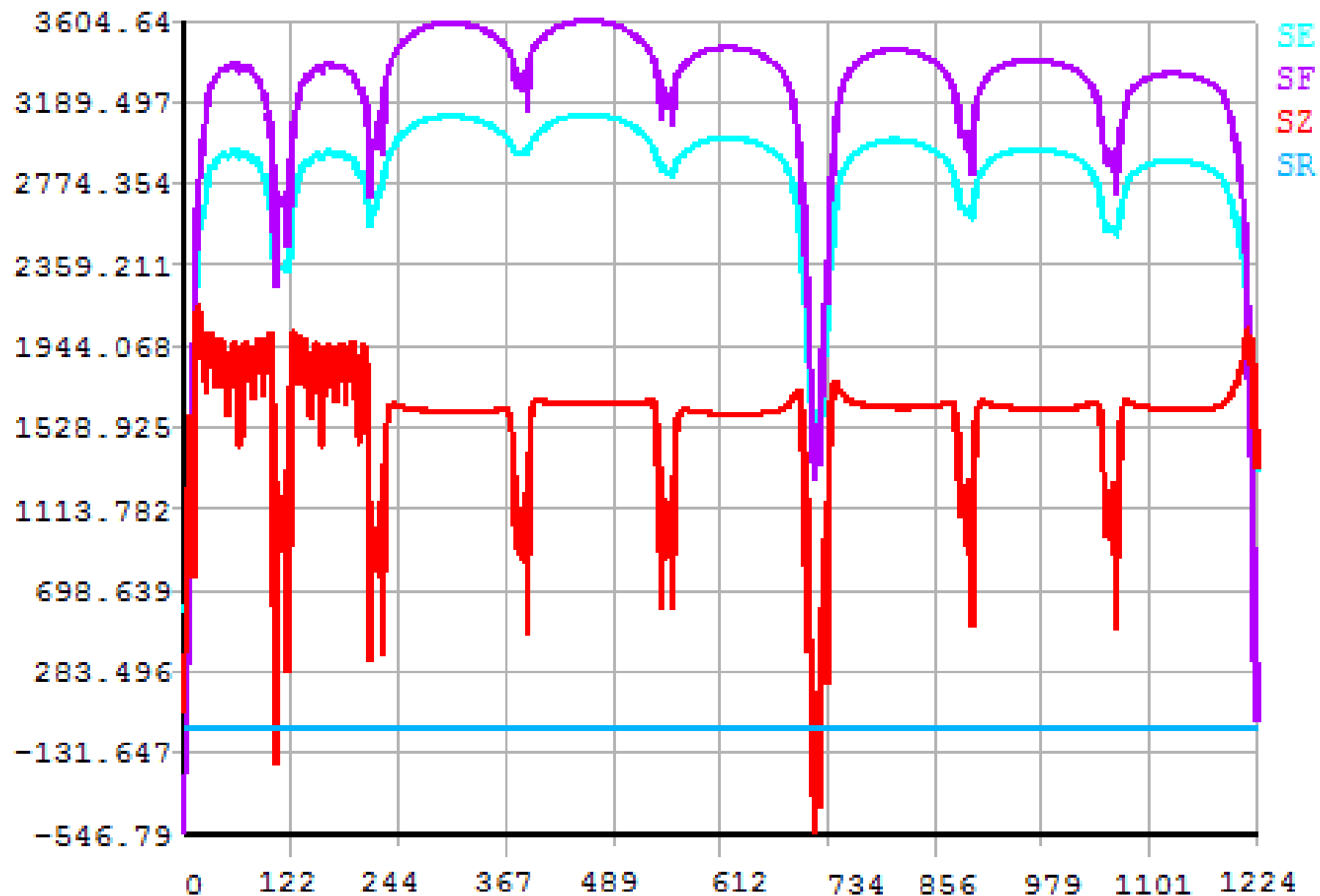


Рис. 2.4. Напруження на внутрішній поверхні бака при $p=8.93$ кг/см^2

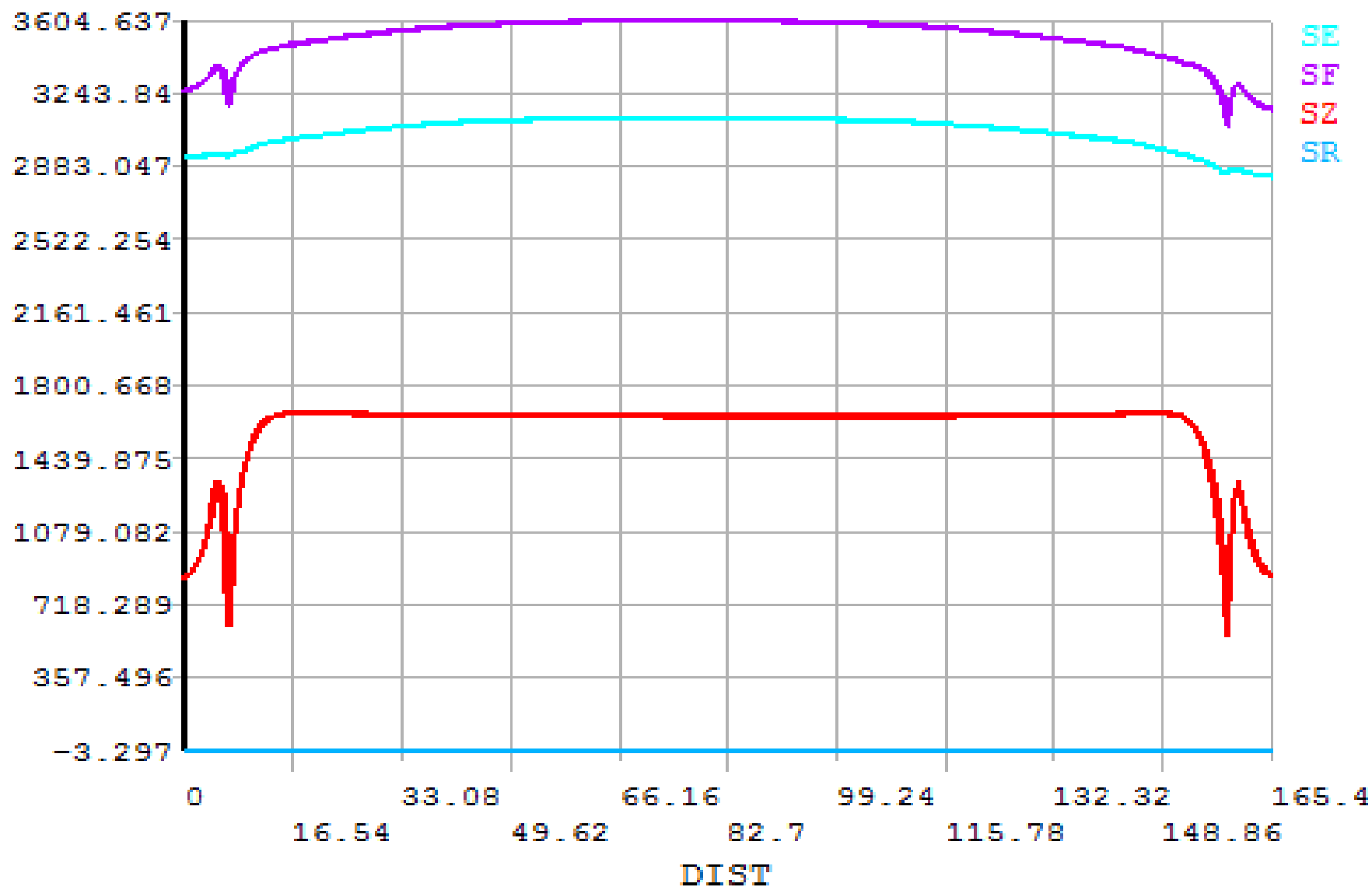


Рис. 2.5. Колові (Sf), осьові (Sz), радіальні (Sr), еквівалентні (SE) напруження на внутрішній поверхні обичайки "К" при $p=8.93 \text{ кг/см}^2$

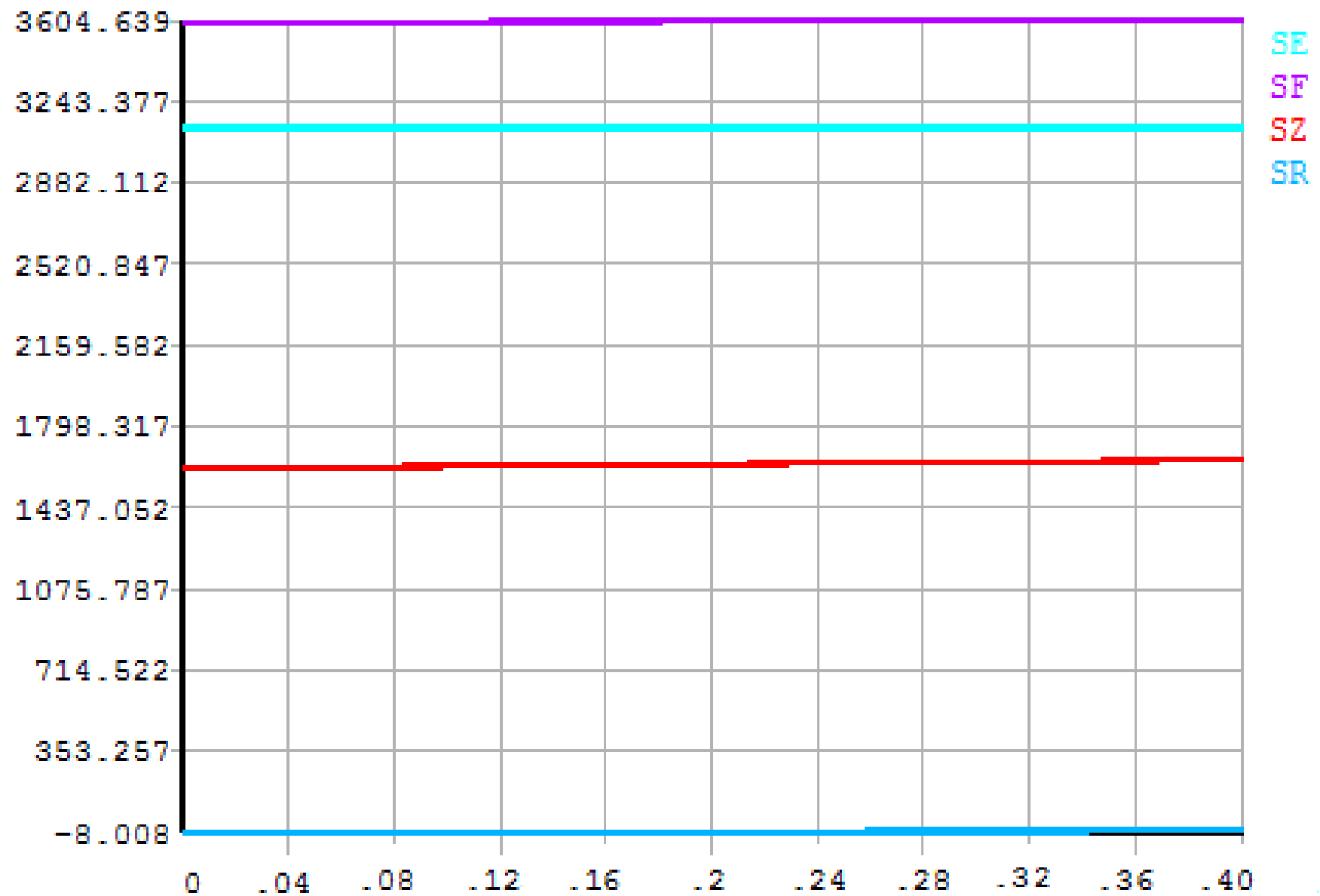
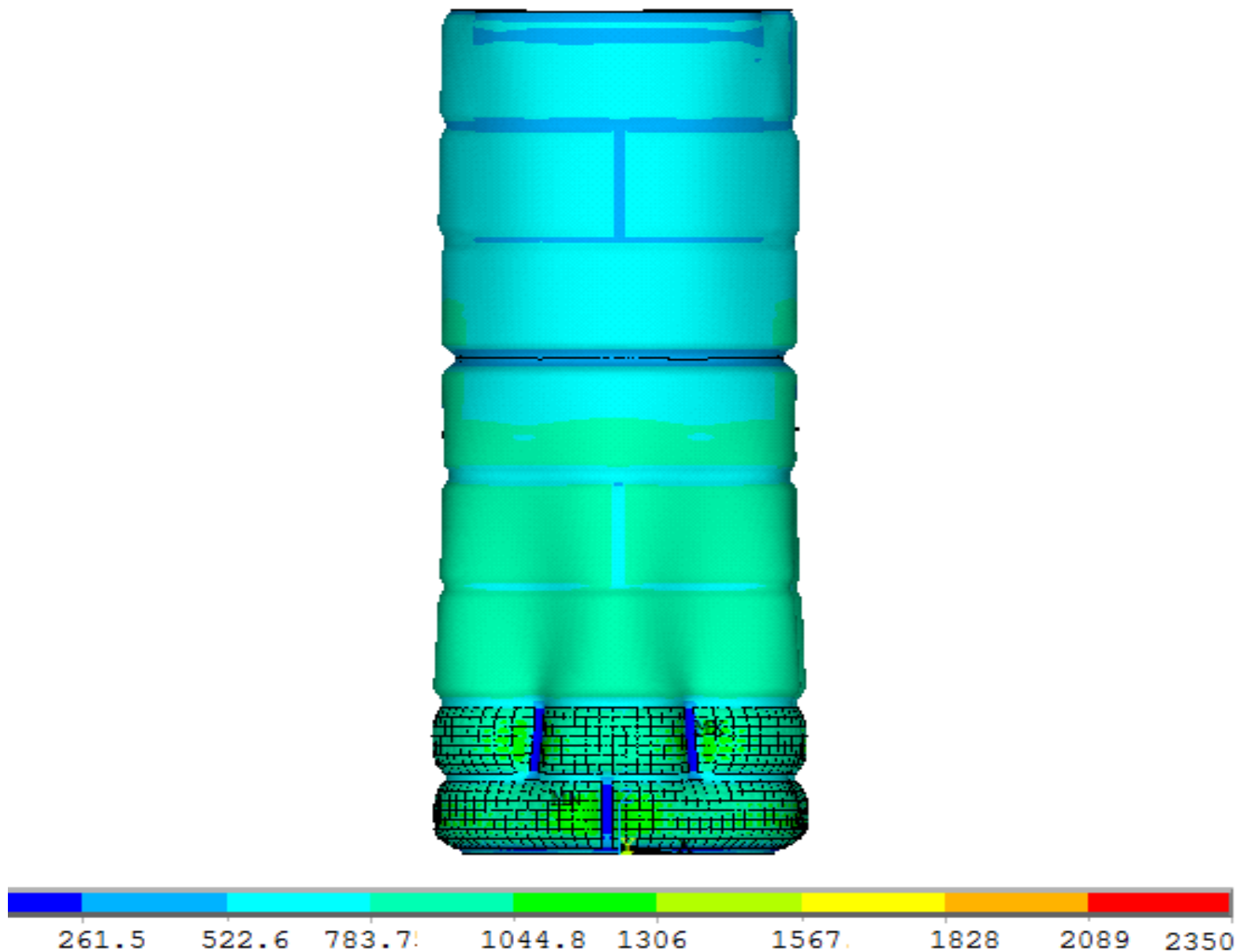


Рис. 2.6. Напруження за товщиною в найбільш напруженому місці бака (обичайка "К")



**Рис. 2.7. Еквівалентні напруження в баку при $p=3 \text{ кг/см}^2$
(оболонкова модель)**

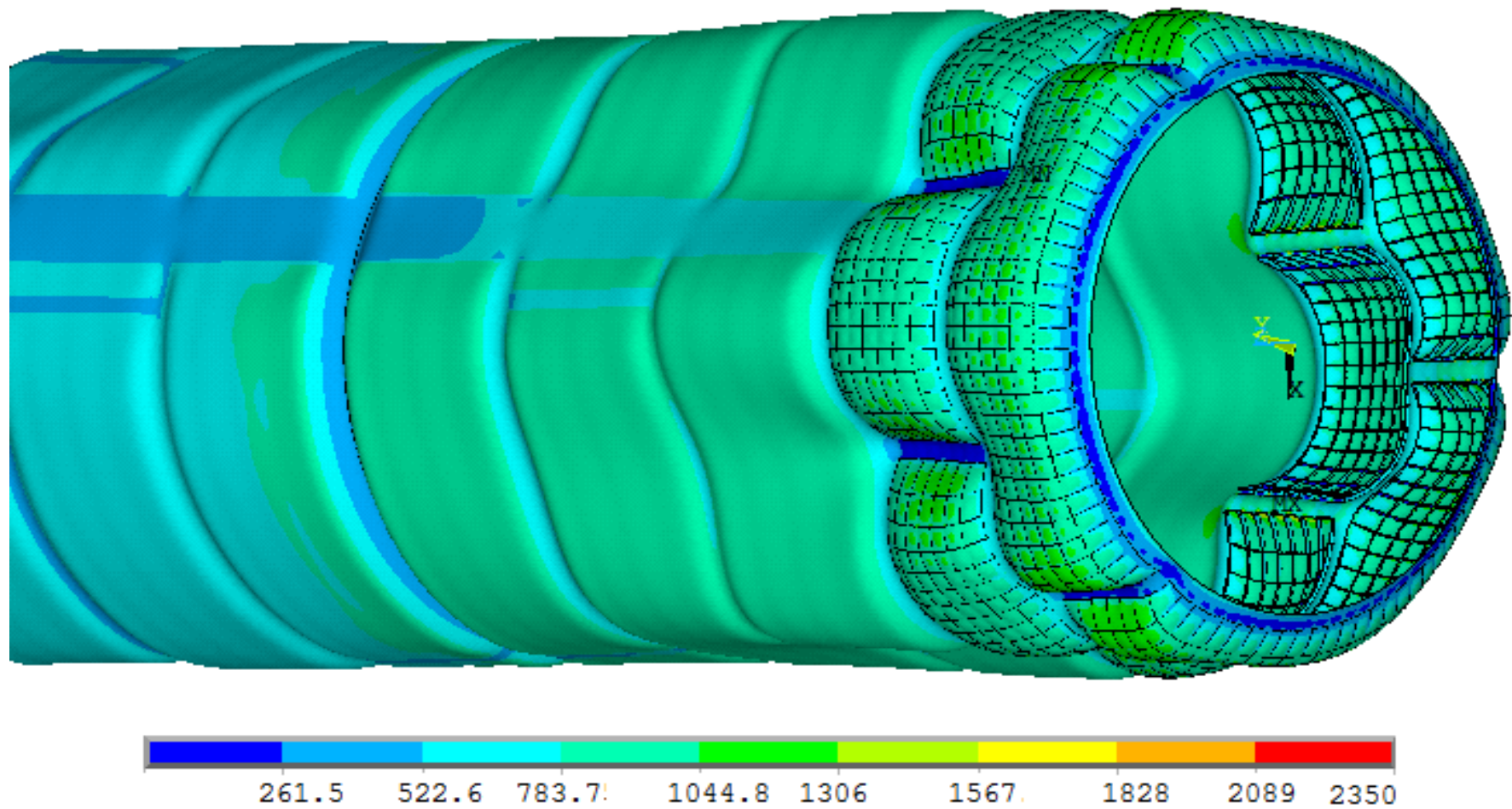


Рис. 2.8. Еквівалентні напруження в баку при $p=3 \text{ кг/см}^2$

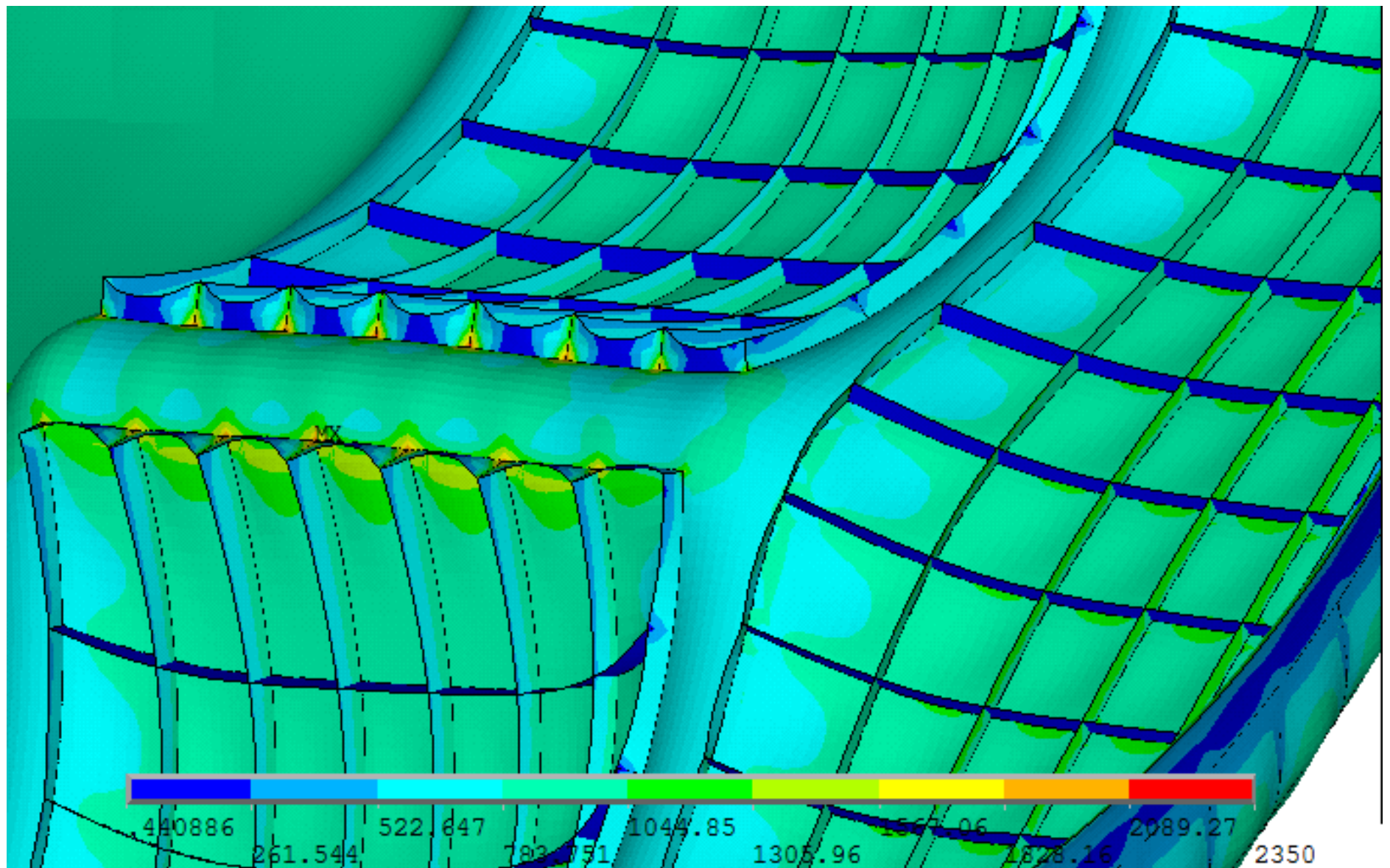


Рис. 2.9. Еквівалентні напруження в баку при $p=3 \text{ кг/см}^2$

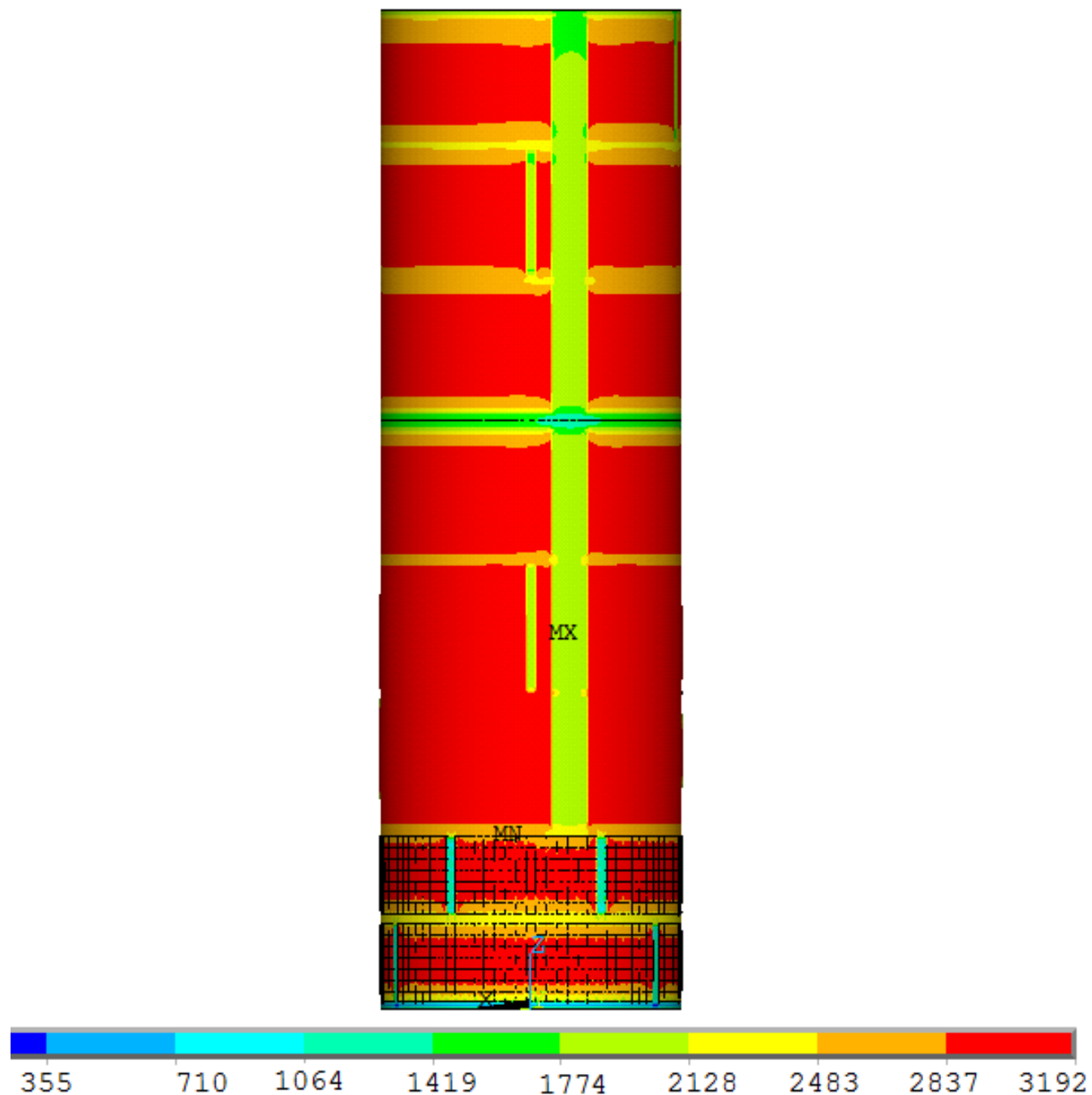
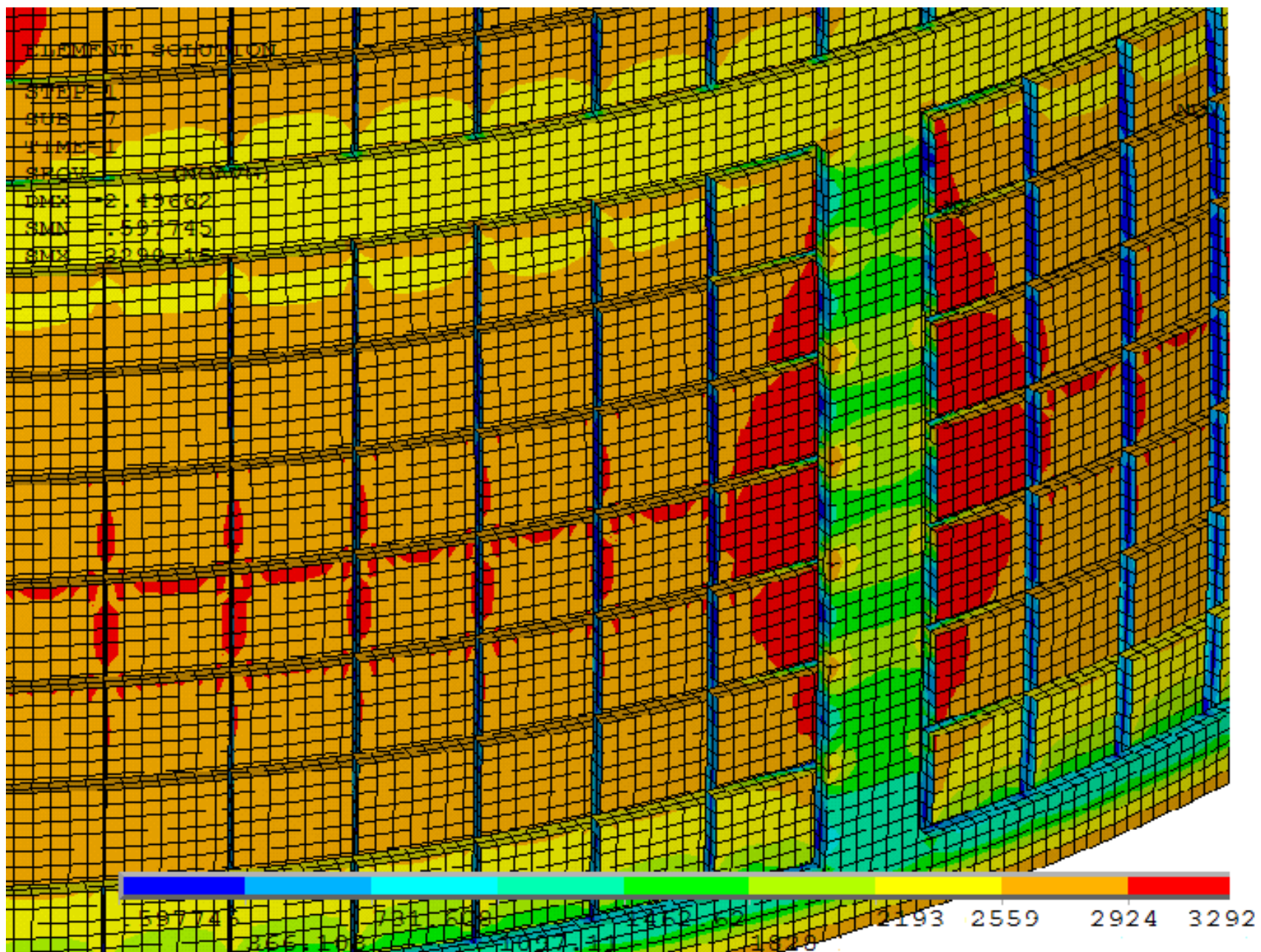


Рис. 2.10. Еквівалентні напруження в баку при $p=8.94 \text{ kg/cm}^2$



**Рис. 2.11. Еквівалентні напруження у вафельних обичайках
при $p=8.94 \text{ кг/см}^2$**

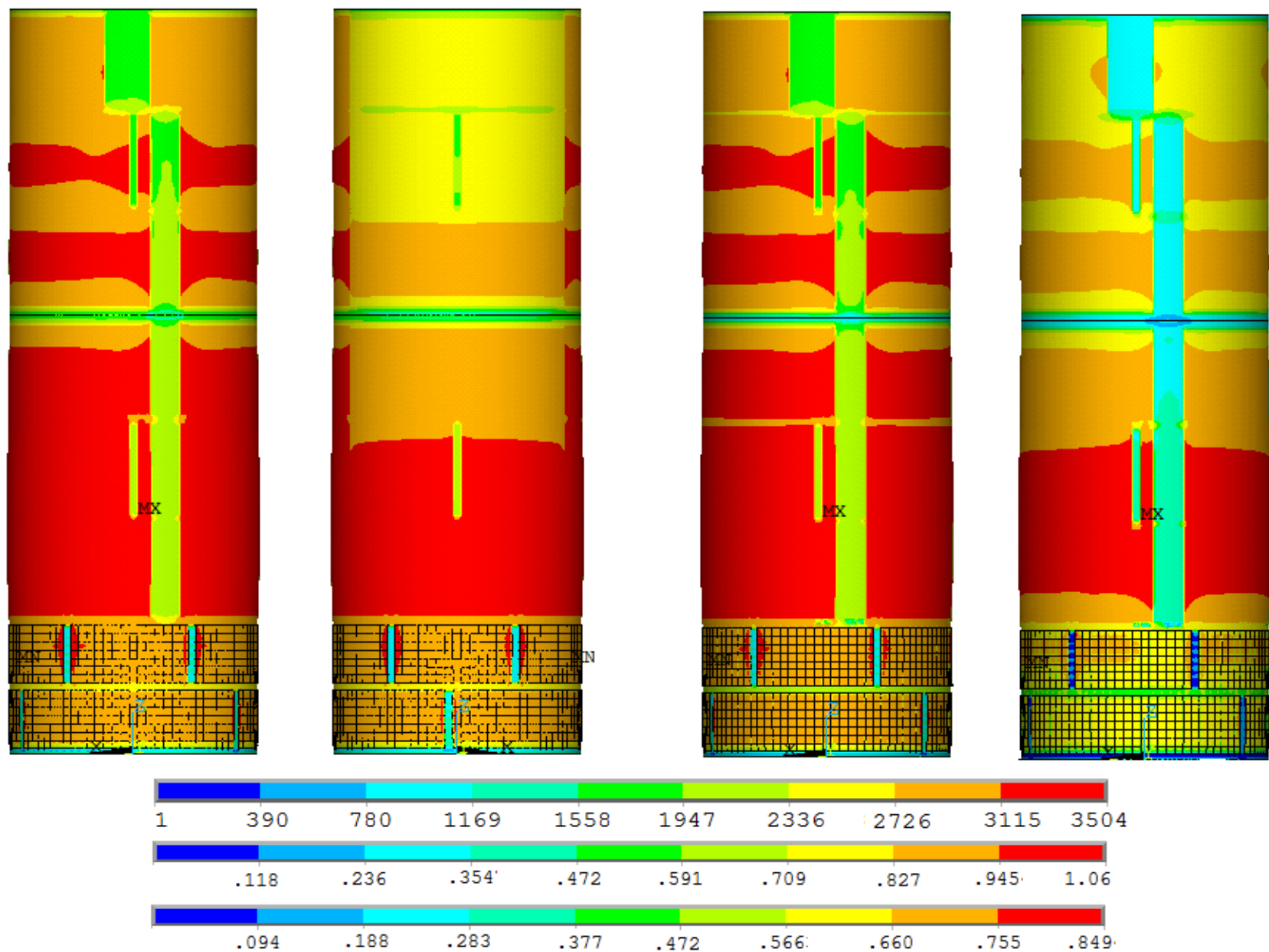


Рис. 2.12. Еквівалентні напруження, значення критерію максимальних напружень і значення критерію Tsai Wu при $p=9.5 \text{ кг/см}^2$

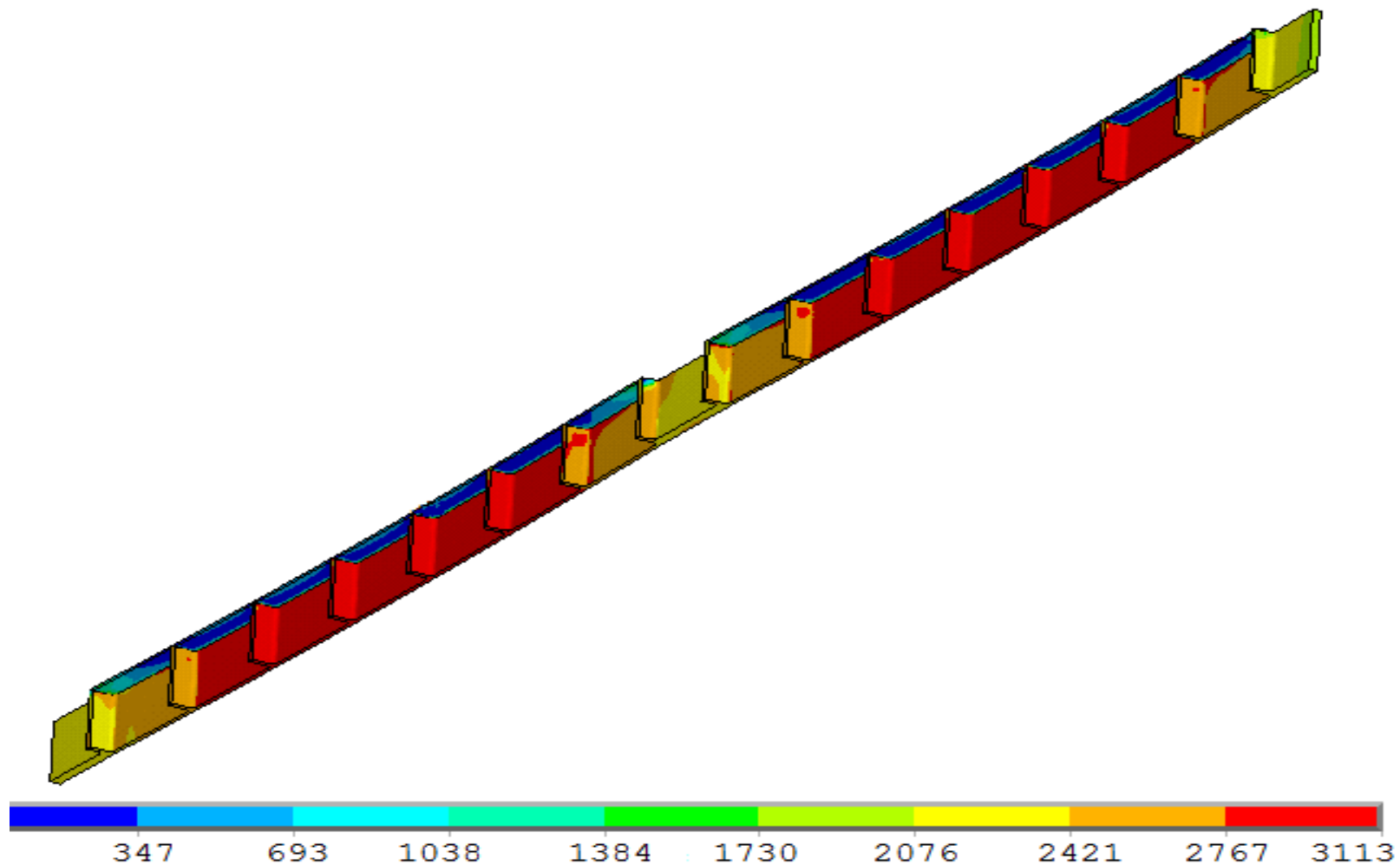


Рис. 2.13. Тривимірний напружено-деформований стан обчайок "С" та "Р" ($p=8.94 \text{ kg/cm}^2$)

З умов симетрії розглянуто сектор що відповідає половині вафельної комірки 137 мм x 136 мм.

3. Програмне забезпечення для реалізації методології визначення руйнівного навантаження бака окислювача з урахуванням результатів неруйнівних експериментальних досліджень

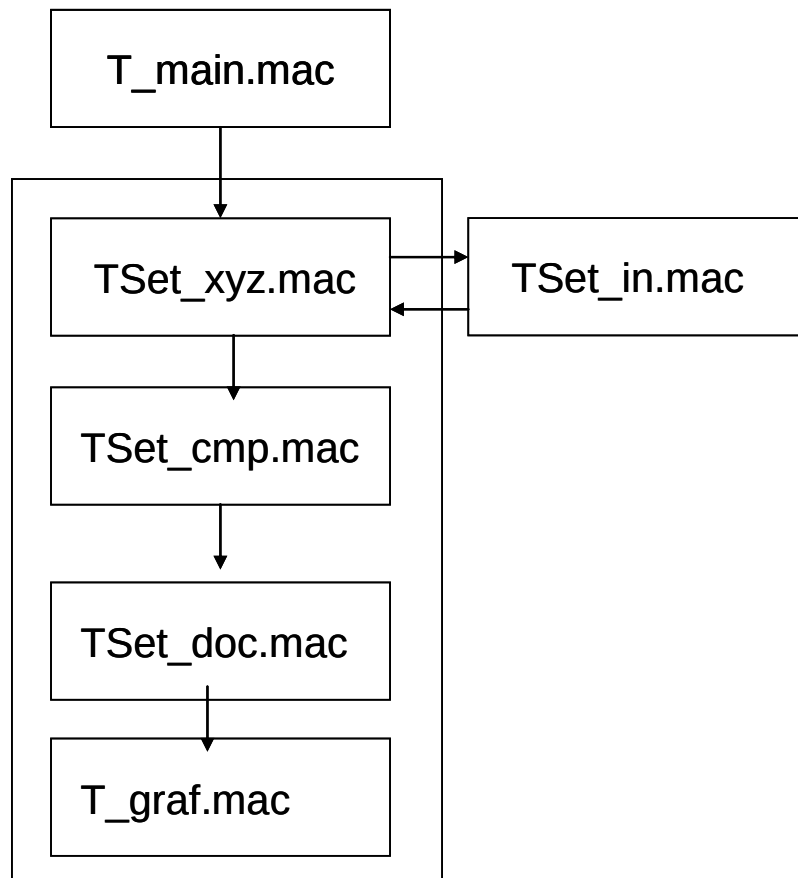


Рис. 3.1. Блок-схема програмного забезпечення

Блок опрацювання експериментальних даних (рис. 3.1) про деформації під час поетапного випробування конструкції включає такі програмні модулі, що розміщені у файлах мас-типу:

- T_main.mas – керуюча програма, що здійснює послідовні виклики наступних модулів: TSet_xyz.mas, TSet_cmp.mas, TSet_doc.mas, T_graf.mas;
- TSet_in.mas – містить всю необхідну інформацію про місця розміщення тензорезисторів для експериментальних вимірювань деформацій на обичайках конструкції (масив T_pos), виміряні значення деформацій у тензорезисторах для усіх етапів навантаження (масив T_Dat), орієнтація площин уявних перетинів, відносно яких розставлено тензодатчики (масив Plane_O), а також їхні буквенні позначення (до 5 символів) у масиві T_Lbl. Додатково масиви –Cross_B, Sh_Geom. Цей файл має бути сформований діалоговою програмою вводу вхідних параметрів Tank 1.0 до початку запуску на виконання опрацювання блоку опрацювання даних тензометрії, або сформований вручну в будь-якому текстовому редакторі з дотриманням синтаксису мови APDL **ANSYS;**

- TSet_xyz.msc – перетворює вхідну інформацію про розміщення тензорезисторів щодо однієї з 4 уявних площин перетину на кожній з 6 обичайок у глобальну систему координат розрахункової моделі конструкції. Тому найперше здійснюється виклик модуля TSet_in.msc), який має вже існувати в робочій папці проекту;
- TSet_cmp.msc – здійснює аналіз конструкції на кожному із 8 заданих етапів навантаження на предмет отримання значень осьової та колової деформації у базі розрахункової моделі та порівнює отримане значення з експериментальними показниками. Організовано як подвійний цикл для перебору усіх етапів навантаження та усіх тензорезисторів. Важливо відмітити, що деформації перед порівнянням автоматично перетворюються з глобальної декартової системи координат до циліндричної системи координат, що адекватно описує орієнтацію кожного з тензорезисторів в осьовому чи коловому напрямі на зовнішній поверхні обичайки;
- TSet_doc.msc – організовує видрук порівняльних таблиць з експериментальними та обчисленими значеннями деформацій та їхню похибку (неузгодження) у відсотках, на кожному з етапів. Ця

інформація слугує для прийняття остаточного рішення про відповідність експериментальних даних та розрахункової скінченно-елементної моделі, необхідності їхнього уточнення чи доопрацювання, можливості прогнозування міцності конструкції за даними неруйнівного контролю (за випробуваннями в пружній області навантажень);

- T_graf.msc – слугує для побудови та візуалізації графіків похибок для деформацій між експериментом та розрахунковою моделлю на кожному з етапів навантаження для вибраних тензорезисторів (обмеження на кількість – до 10 тензорезисторів).
- Команда на запуск блока опрацювання експериментальних даних здійснюється на етапі постпроцесорної обробки розрахованого напружено-деформованого стану скінченно-елементної моделі в діалоговій оболонці **ANSYS** (рис. 3.2).

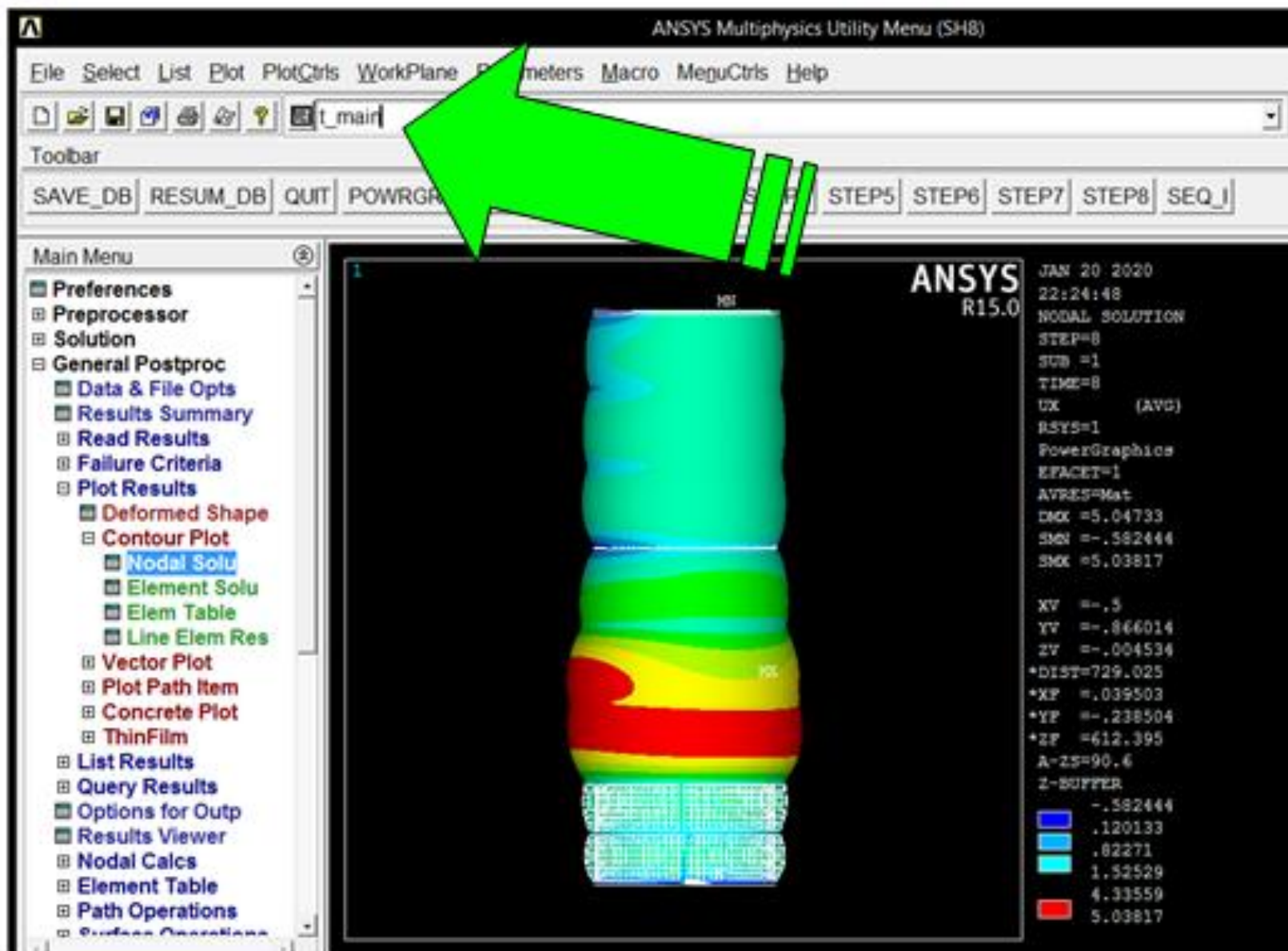


Рис. 3.2. Запуск модуля опрацювання даних тензометрії командою T_main у командній стрічці ANSYS.

Опис програмного продукту TANK 1.0

Прикладне програмне забезпечення створене в програмному середовищі **Delphi**.

Побудовані програмні засоби щодо можливостей вводу, корекції, збереження та імпорту інформації між модулями програмного комплексу. Створений зручний інтерфейс користувача та засоби візуального та програмного контролю введених даних, розроблення (дизайн) структур даних як для внутрішнього представлення, так і для передачі коректної та повної інформації для подальшого опрацювання і використання в програмі **ANSYS**.

У головному вікні програми (рис. 3.3) містяться:

- графічний редактор, що дозволяє візуалізовувати ескіз об'єкта моделювання;
- головне меню програми;
- панель для задання геометричних та фізичних параметрів об'єкта моделювання;
- кнопки для введення і редагування даних, відкриття та збереження інформації.

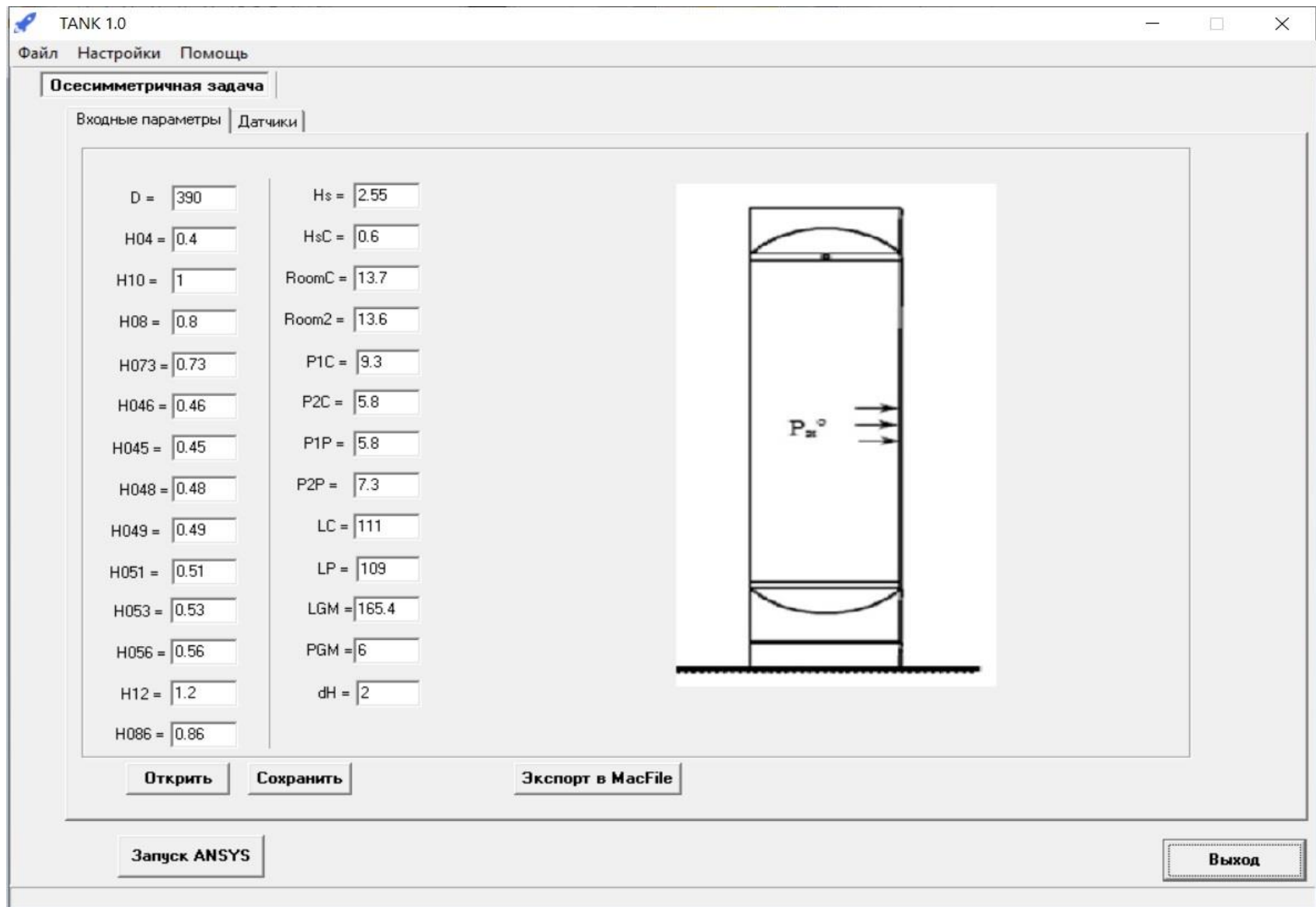


Рис. 3.3. Головне вікно програми

У головному меню програми (рис. 3.4) закладений доступ до всіх інструментів управління програмою. У головному меню програми є можливості відкриття та збереження даних у відповідні двійкові, або текстові файли; збереження даних у спеціальному форматі *.mas файлів. Розроблені інструменти для налаштування авто шляхів до потрібних файлів.

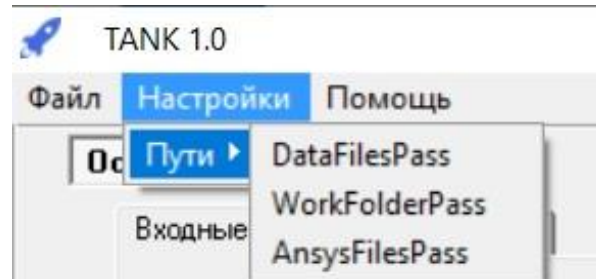


Рис. 3.4. Меню налаштування шляхів доступу до файлів

Програма оздоблена додатковими піктограмами для швидкої навігації та маніпуляції даними.

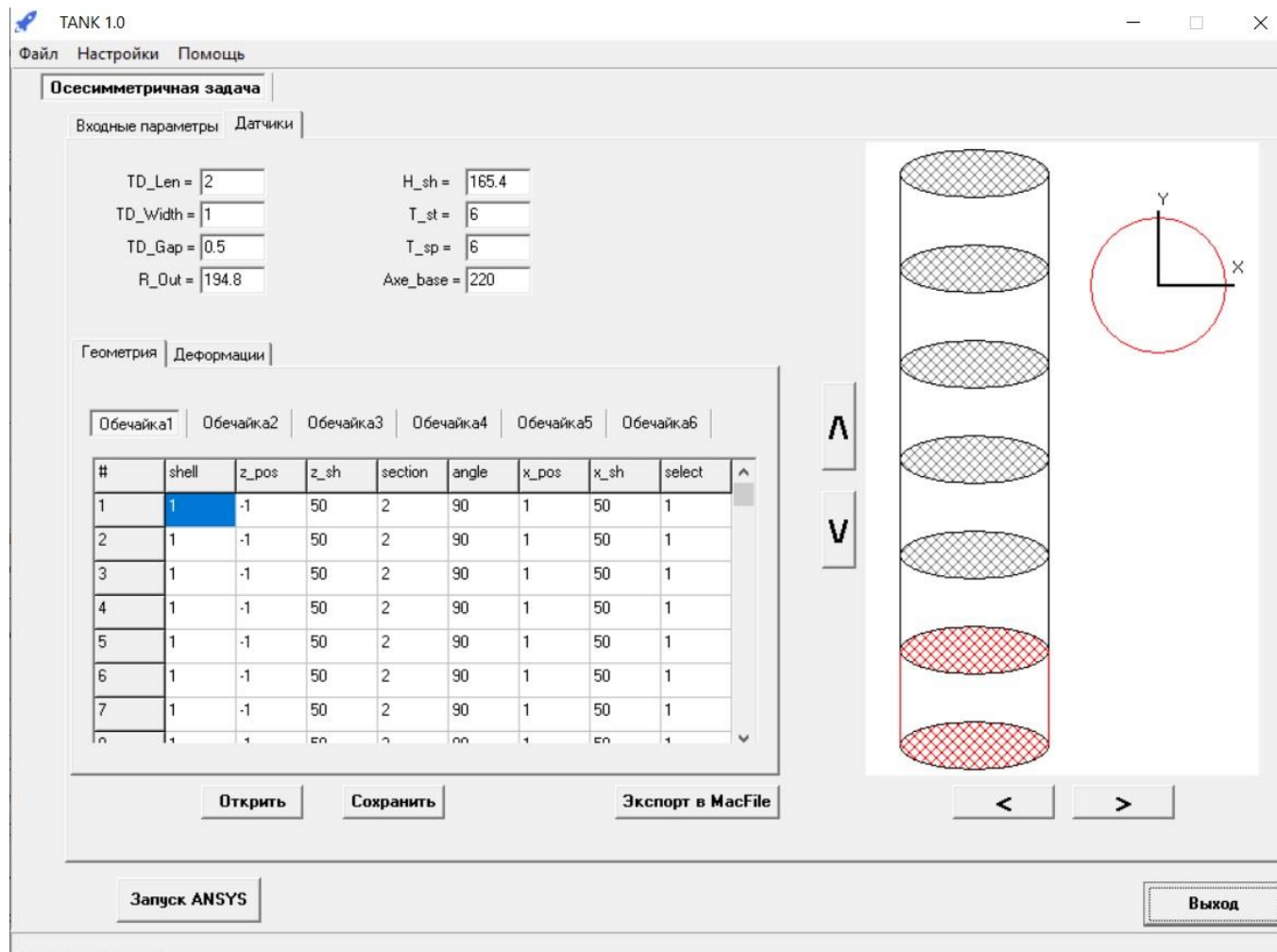


Рис. 3.5. Діалогове вікно вводу інформації про розміщення тензодавачів

На панелі задання даних у закладці **Входные** параметри задаються геометричні параметри бака. На закладці **Датчики** задається розміщення давачів на конструкції бака, де показано місце та орієнтацію

тензодатчиків відносно двох взаємоперпендикулярних осьових перерізів бака. Давачі подано з прив'язкою до відповідних обечайок на глобального номеру та назви давача.

У підзакладці **Деформации** вказано експериментальні покази (деформації) тензодавачів.

Геометрия Деформации

Обечайка1 Обечайка2 Обечайка3 Обечайка4 Обечайка5 Обечайка6

#	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0.029	0.054	0.077	0.09	0.094	0.116	0
2	0	0.064	0.126	0.184	0.218	0.23	0.32	0
3	0	0.014	0.032	0.049	0.059	0.063	0.081	0
4	0	0.061	0.123	0.186	0.222	0.234	0.33	0
5	0	0.028	0.053	0.075	0.088	0.092	0.115	0
6	0	0.075	0.143	0.209	0.246	0.258	0.354	0
7	0	0.027	0.054	0.079	0.094	0.098	0.123	0
8	0	0.063	0.124	0.184	0.217	0.23	0.319	0

Открыть Сохранить Экспорт в MacFile

Рис. 3.6. Діалогове вікно вводу інформації, знятої з тензодавачів

У вікні графічного редактора (рис. 3.7) здійснюється візуалізація геометрії об'єкта. За допомогою кнопок прокручень можна здійснювати навігацію по елементах бака. В програмі є можливість маніпулювати масштабом зображення за допомогою скроллера, або компонент.

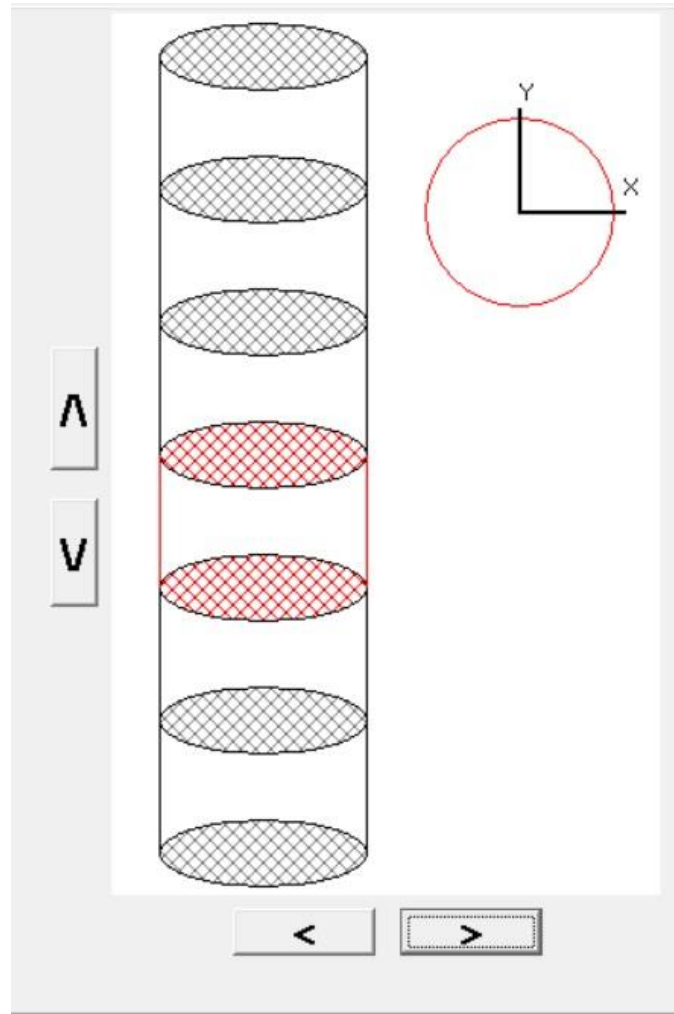


Рис. 3.7. Вікно візуального контролю вхідної інформації

Дані відкриваються та зберігаються у текстових файлах та експортуються у тас файл. У програмі є можливість міняти одиниці вимірності для оперативних даних (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Вікно вибору одиниць вимірювання

Для всіх вхідних параметрів у підказках відображаються їх відповідні назва і опис (рис. 3.9).

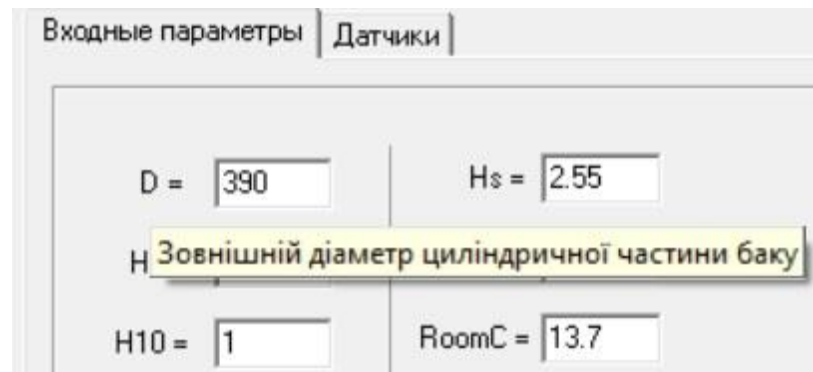


Рис. 3.9. Програмні засоби вводу параметрів.

ВИСНОВКИ

- Сформульовані основи методології визначення фактичних руйнівних навантажень на тонкостінні конструкції складної форми за геометрично нелінійного та пружно-пластичного деформування внаслідок дії внутрішнього тиску з урахуванням результатів неруйнівних експериментальних випробувань та вказані шляхи їх програмної реалізації.
- Відповідно до схеми навантаження бака окислювача першої ступені в експериментальних дослідженнях на визначення руйнівного навантаження засобами комп'ютерного моделювання визначено місце, з якого ймовірно почнеться руйнування і отримане значення руйнівного навантаження для бака. Показано, що з результатами експериментальних досліджень найкраще узгоджуються результати комп'ютерного моделювання, отримані з використанням критерію максимальних напружень. Критерії міцності Мізеса та Цай-Ву дають значно завищені значення руйнівного навантаження.
- Порівняльний аналіз деформацій, отриманих шляхом

експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання вказує на істотну розбіжність.

- На основі розроблених математичної моделі за геометрично та пружно-пластичного деформування оболонок зі складною геометрією будови та відповідної методики створено методологію і програмне забезпечення для дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних конструкцій з урахуванням результатів неруйнівних експериментальних досліджень.
- Запропонована методологія дозволила провести низку числових експериментів і отримати важливі з практичної точки зору результати. Комп'ютерне моделювання процесів деформування бака окислювача за дії внутрішнього тиску виконано в рамках різних модельних припущень. Зокрема досліджено його напружено-деформований стан з використанням оболонкової, осесиметричної та тривимірної теорії пружно-пластичності. Розглянуто випадки геометрично лінійного і нелінійного деформування. Отримано оцінки знизу для руйнівного навантаження в рамках розглянутих

математичних моделей.

- Обчислювальні експерименти виявили, що найнавантаженішими зонами паливного бака є відносно невеликі околиці поєднання шпангоутів з внутрішньою циліндричною поверхнею бака. Ці локальні максимуми досягають свого абсолютного значення в околицях крайніх колових шпангоутів окремих обичайок, що межують з перехідними зонами для зварювання, звідки ймовірно може починатись руйнування.
- Внаслідок локального впливу геометричних концентраторів типу стрингерів та шпангоутів на напружено-деформований стан бака його розрахунок на міцність в рамках оболонкових моделей може приводити до істотних відхилень отримуваних результатів від фактичних в околицях зон різкої зміни геометричної конфігурації внутрішньої поверхні.

Дякуємо за увагу!