

УДК 622.691.4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОМБІНОВАНИХ ПОСУДИН ВИСОКОГО ТИСКУ

Джус А.П.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

У статті наведено результати досліджень особливостей напружено-деформованого стану елементів комбінованих посудин високого тиску. Встановлено, що утворення кільцевих тріщин, зумовлених втратою цілісності композитного підсилення, призводить до збільшення рівня осьових і колових напружень в крайніх ділянках циліндричної частини металевий лейнера. Характер деформацій цих ділянок є таким, що сприяє зростанню рівня напружень і утворенню тріщин в металі за умов його корозійного пошкодження.

Ключові слова: комбіновані посудини високого тиску; композитне підсилення; металевий лейнер, напруження.

Постановка проблеми. Одним з недоліків конструкцій довгомірних бандажованих виробів, що працюють в умовах сприйняття змінного внутрішнього тиску та перепаду температур і складені із різнорідних матеріалів, наприклад, балонів типу CNG-2 [1], є невідповідність їх деформаційних характеристик. В силу наявності у посудинах що працюють під тиском осьових деформацій, для балонів типу CNG-2 має місце руйнування однонаправленого композитного матеріалу. Утворені при цьому тріщини не впливають на міцність композитного підсилення загалом, але ймовірно вносять корективи у формування картини напружено-деформованого стану елементів конструкцій.

Зважаючи на це, дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій, аналогічних конструкції балону типу CNG-2, є без сумніву необхідним. Особливої актуальності це питання набуває з огляду на те, що в області кільцевих тріщин бандажу спостерігається утворення площин ковзання [2]. Наявність вологи, контакт з повітрям призводять до корозійного пошкодження металевий оболонки. Всі ці чинники сприяють зносу контактуючих поверхонь, що в кінцевому підсумку змінює умови контакту між ними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загалом питання, пов'язані з можливими конфігураціями зон контакту бандажу із циліндричною оболонкою, розглянуті свого часу в роботах [3, 4]. Також результати дослідження характеру контактної взаємодії циліндричної оболонки з жорстким бандажем висвітлені у [5]. Вивченню схем контактної взаємодії циліндричної оболонки з бандажем саме із композитного матеріалу присвячені дослідження, результати яких наведені в [6]. Оскільки бандажування композитними матеріалами є одним з сучасних способів ремонту магістральних газопроводів, авторами вказаної роботи для конкретних параметрів з'єднання визначено критичні довжини бандажу і виконаний аналіз напружено-деформованого стану для циліндричної оболонки з бандажем із ортотропного матеріалу. Беручи до уваги факт утворення в композитному підсиленні балона кільцевих тріщин підсилюючи композитну оболонку необхідно розглядати як сукупність бандажів невеликої довжини. Тому необхідним є дослідження взаємодії з металевий циліндричною оболонкою не одного композитного бандажу, а їх сукупності.

Мета статті. Таким чином, метою досліджень є оцінка впливу змін умов контакту металевий

циліндричної оболонки з композитним підсиленням, зумовлених втратою його цілісності, на особливості формування картини напружено-деформованого стану елементів конструкції.

Виклад основного матеріалу. При вирішенні багатьох завдань, які постають перед дослідниками та інженерами і не піддаються аналітичному вирішенню або потребують значних витрат часу, можливістю прискореного аналізу існуючої проблеми є імітаційне моделювання. Прогрес у розробці числових методів дає можливість істотно розширити спектр питань, які доступні аналізу. Отримані на основі цих методів результати використовуються практично у всіх галузях науки й техніки. На особливу увагу заслуговує, зокрема, метод кінцевих елементів.

Коректність вирішення цим методом необхідних нам завдань значною мірою залежить від вибору рівня деталізації структури композитного матеріалу. Моделювання волокнистих композитів, у яких матриця армується високоміцними волокнами, ускладнюється їх анізотропією, що залежить від напрямку волокон, порядку і місця їх розташування. Основними проблемами використання методу скінченних елементів при моделюванні композитного матеріалу можна вважати границі його застосування за рівнями деталізації (макромеханічний, мезомеханічний, мікромеханічний) [7]. Макромеханічний метод не здатний враховувати взаємодії всередині композиту, тому дає велику похибку при орієнтації волокон більше 90°. Мезомеханічний метод використовується тільки для розгляду взаємодії сусідніх шарів між собою, оскільки не враховує взаємодії в них. Проблемою мікромеханічного методу, є труднощі у визначенні властивостей матриці, волокон, і особливо когезійних зв'язків між ними. Більше того, практично не можливо змодельювати неоднорідність шарів композиту.

Для випадку циліндричної оболонки з композитним підсиленням можливим є моделювання останнього як об'ємного елемента, для якого досить визначити усереднені характеристики матеріалу в усіх напрямках. Іншим варіантом є використання класичної теорії шаруватих матеріалів і, відповідно, моделювання композитного підсилення шаруватими оболонковими елементами [8, 9].

Для оцінки можливості моделювання композитного підсилення у вигляді об'ємного елемента, при дослідженні напружено-деформованого стану елементів конструкції (балону типу CNG-2),

розглянемо одну із задач, розв'язки для якої отримано в [6]. Об'єктом дослідження є нескінченно довга циліндрична оболонка, на яку без натягу і зазору встановлений бандаж зі склопластику (рис. 1). Довжина бандажу є змінною величиною, що впливає на конфігурацію контакту. Оболонка навантажується внутрішнім тиском. Осьові зусилля в оболонці і бандажі відсутні. Бандаж розглядається як суцільна ортотропна циліндрична оболонка. При цьому $R = 1015$ мм; $h = 10$ мм; $h_b = 20$ мм; $P = 6$ МПа. Властивості матеріалів оболонки і бандажу наведені в таблиці 1 [6].

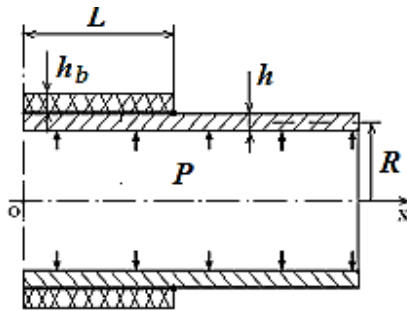


Рис. 1. Розрахункова схема:

R – радіус середньої поверхні оболонки;
 h – товщина оболонки; h_b – товщина бандажу

Таблиця 1
 Властивості матеріалів елементів моделі [6]

Оболонка (Сталь 09Г2С)		Бандаж (склопластик)					
E , ГПа	200	E_1 , ГПа	18,6	μ_{12}	0,15	G_{12} , ГПа	4
μ	0,3	E_2 , ГПа	24,6	μ_{13}	0,42	G_{13} , ГПа	3
σ_T , МПа	350	E_3 , ГПа	6	μ_{23}	0,18	G_{23} , ГПа	3

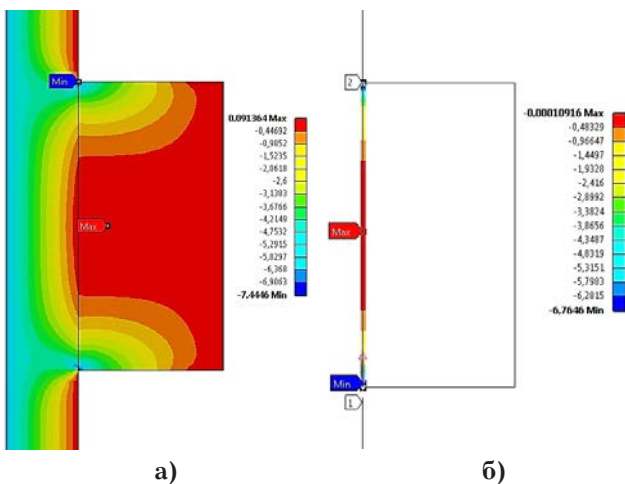


Рис. 2. Розподіл радіальних напружень в елементах конструкції (а) та на внутрішній поверхні бандажу (б) (МПа)

Імітаційне моделювання для зазначених вище умов виконано з використанням методу кінцевих елементів. З метою порівняння отриманих результатів з результатами досліджень, проведених авторами [6], окремо виділено результати для граничного випадку реалізації схеми контакту по двох точках, тобто допоки в точці $x = 0$ прогин бандажу є більшим за прогин оболонки. Згідно [6]

перехід до наступної схеми контакту здійснюється при довжині бандажу, рівній 40 мм. Найбільш інформативною, з отриманих саме для такого випадку результатів, є картина розподілу радіальних напружень в елементах конструкції та особливо на внутрішній поверхні бандажу (рис. 2). Як бачимо, на середині бандажу значення радіальних напружень є близьким до нуля (рис. 2 б).

Таким чином можна стверджувати, що моделювання композитного підсилення у вигляді об'ємного елемента при дослідженні напружено-деформованого стану балону типу CNG-2 забезпечує прийнятну для розв'язку необхідних задач точність.

Відмінність розрахункової схеми, що реалізується в балонах типу CNG-2, від розрахункової схеми розглянутої вище, полягає в існуванні початкових напружень у елементах конструкції.

В роботі [10] початкові напруження σ_0^k у композитному підсиленні, створені попереднім натягом ровінгу в напрямку осі волокон матеріалу, визначаються як

$$\sigma_0^k = k \cdot \sigma_{np}, \quad (1)$$

де σ_{np} – напруження в технологічній стрічці в ході намотування;

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + E_1 \cdot h_k / E \cdot h_m}} - \text{коефіцієнт послаблення на}$$

напружень в технологічній стрічці після укладан-

ня її на металевий корпус, де E_1, E – відповідно модуль пружності композиту вздовж волокон та металу лейнера; h_k, h_m – товщина композитного підсилення та металевого лейнера. Для розглянутого в [10] варіанту конструкції напруження в технологічній стрічці становлять 122 МПа. Відповідно початкові напруження у композитному підсиленні $\sigma_0^k = 110$ МПа.

Початкові кільцеві напруження в металевому лейнері $\sigma_{\theta 0}^m$, створені попереднім натягом ровінгу при намотуванні, за умов відсутності внутрішнього тиску пов'язані із початковими напруженнями σ_0^k у композитному підсиленні залежністю

$$\sigma_{\theta 0}^m = -\sigma_0^k \cdot \frac{h_k}{h_m} \quad (2)$$

і становлять 98 МПа для балона з параметрами $h_m = 3,15$ мм, $h_k = 2,8$ мм.

За таких початкових умов абсолютна діаметральна деформація металевого лейнера та композитного підсилення відповідно визначається як

$$\Delta d_m = \frac{\sigma_{\theta 0}^m \cdot d_m^c}{E}; \Delta d_k = \frac{\sigma_0^k \cdot d_k^c}{E_1}, \quad (3)$$

де $d_m^c = D + h_m$, $d_k^c = D + 2 \cdot h_m + h_k$, D , – внутрішній діаметр металевого лейнера ($D = 0,205$ м), і для розглянутого вище випадку становить $\Delta d_m = -1,02 \cdot 10^{-4}$ м, $\Delta d_k = 4,722 \cdot 10^{-4}$ м. При цьому натяг в утвореному з'єднанні рівний $\delta = \Delta d_k - \Delta d_m = 4,722 \cdot 10^{-4} - (-1,02 \cdot 10^{-4}) = 5,742 \cdot 10^{-4}$ м.

З метою імітаційного моделювання, для зазначених вище параметрів і з врахуванням визначеного натягу, створено твердотільну модель балона типу CNG-2. Властивості матеріалів металевого лейнера та композитного підсилення наведені в таблиці 2. Оскільки автором [10] вказується тільки значення модуля пружності композиту вздовж волокон (E_1), а інші необхідні для моделювання дані відсутні, в таблиці 2 подано повну характеристику композиту з наближеними властивостями згідно [11].

Таблиця 2
Властивості матеріалів елементів балону
типу CNG-2

Металевий лейнер (30ХГСА)		Композитне підсилення (склопластик)					
Е, ГПа	200	Е ₁ , ГПа	44,38	μ ₁₂	0,32	Г ₁₂ , ГПа	4,95
μ	0,3	Е ₂ , ГПа	18,15	μ ₁₃	0,27	Г ₁₃ , ГПа	4,41
σ _т , МПа	1000	Е ₃ , ГПа	18,15	μ ₂₃	0,32	Г ₂₃ , ГПа	4,95

За умов відсутності внутрішнього тиску отримано картину напружено-деформованого стану балону, відповідно до якої розподіл колових напружень має вигляд наведений на рисунку 3. Номінальні колові напруження в металевому лейнері та в композитному підсиленні корелюються із вищевизначеними згідно наведеної в [10] методики.

Певна кореляція щодо колових напружень спостерігається і за внутрішнього тиску 20 МПа (рис. 4). Характер розподілу напружень по довжині циліндричної частини є однорідним за виключенням перерізів, близьких до сферичних днищ. Щодо осьових напружень в композитному підсиленні, слід зазначити, що вони перевищують границю міцності матеріалу в поперечному напрямку [12]. Тобто, як і зазначалось вище, має місце розтріскування шару ще до моменту досягнення робочого тиску. У цьому випадку матеріал не здатний чинити опір навантаженню в трансверсальному напрямку і зрушенню в площині армування, проте здатний чинити опір деформуванню в напрямку армування.

Подальші дослідження проводились для аналогічної моделі балону, однак, композитне підсилення з метою врахування змін умов контакту зумовлених втратою його цілісності, моделювалось сукупністю бандажів шириною 15 мм із зазором між ними рівним 0,1 мм. Щодо ширини, то вона прийнята на основі огляду композитного підсилення балона типу CNG-2 відповідного діаметра.

В ході аналізу результатів, отриманих при імітаційному моделюванні балону за наявності кільцевих тріщин в композитному підсиленні, встановлено окремі особливості формування картини напружено-деформованого стану елементів конструкції. На особливу увагу заслуговує той факт, що ділянки циліндричної частини балону близькі до сферичних днищ, характеризують-

ся явно вираженою нерівномірністю на довжині близько 45 мм. Про це свідчить розподіл осьових напружень в елементах конструкції (рис. 5).

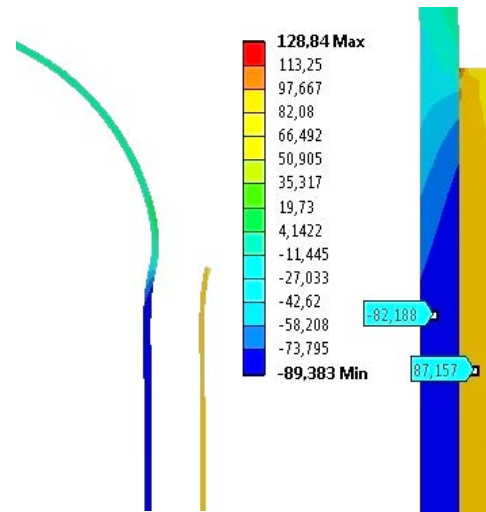


Рис. 3. Розподіл колових напружень в елементах конструкції за умов відсутності внутрішнього тиску та характер їх деформування

Наявність зони їх максимуму на зовнішній поверхні металевого лейнера в околі кільцевої тріщини (першої від краю композитного підсилення) за умов ймовірного корозійного пошкодження зумовлюватиме зростання рівня напружень і, як наслідок, сприятиме утворенню тріщин. Колові напруження на вказаній ділянці також характеризуються суттєвою нерівномірністю, однак їх максимум відповідає околу наступної тріщини (рис. 6 а). Щодо радіальних напружень (рис. 6 б), то їх рівень і нерівномірність є значно нижчими.

Висновки. Таким чином, за результатами попередньої оцінки впливу умов контакту елементів комбінованих посудин високого тиску на їх напружено-деформований стан встановлено, що утворення кільцевих тріщин призводить до збільшення рівня осьових і колових напружень в крайніх ділянках циліндричної частини металевого лейнера. Характер деформацій цих ділянок є таким, що корозійне пошкодження металу зумовлене проникністю кільцевих тріщин сприятиме зростанню рівня напружень і утворенню тріщин. Зміни напружено-деформованого стану решти циліндричної частини носять локальний

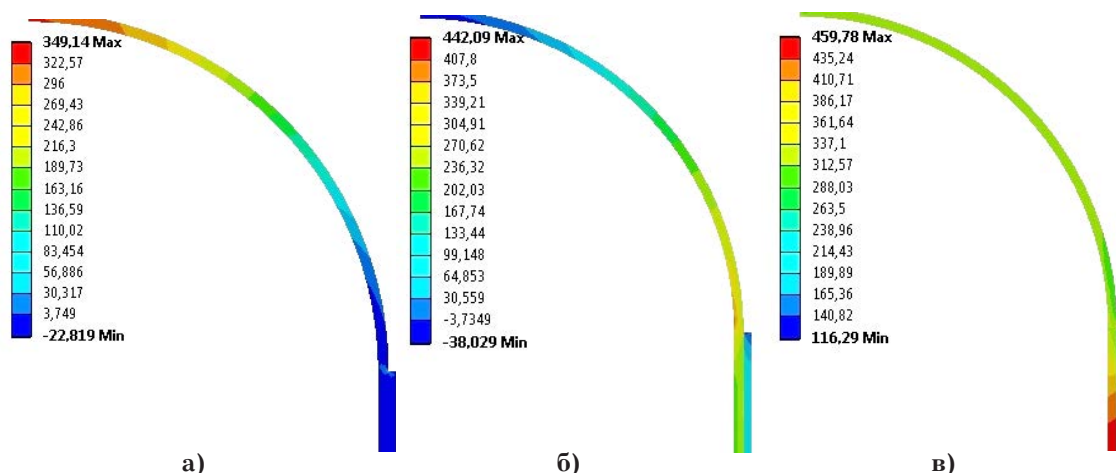


Рис. 4. Розподіл радіальних (а), осьових (б) та колових (в) напружень в елементах конструкції при тиску 20 МПа

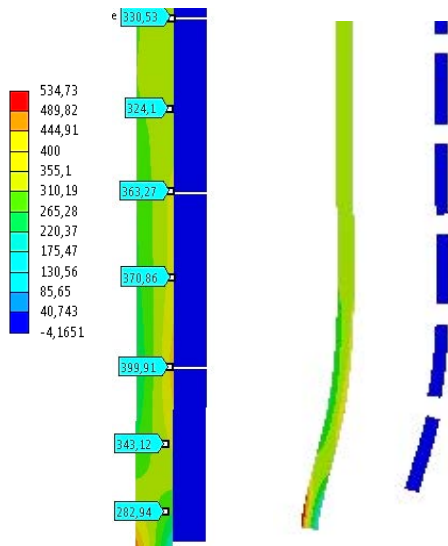


Рис. 5. Розподіл осевих напружень в елементах конструкції при наявності кільцевих тріщин і тиску 20 МПа та характер їх деформування

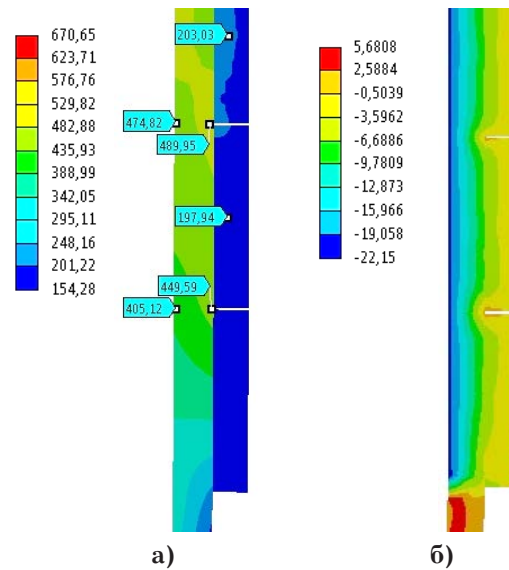


Рис. 6. Розподіл колових (а) та радіальних (б) напружень в елементах конструкції при наявності кільцевих тріщин і тиску 20 МПа

характер, а їх рівень є незначним. В подальшому необхідними є дослідження спрямовані на визначення напружено-деформованого стану небез-

печних ділянок з врахуванням рівня корозійного пошкодження металу та зносу композитного підсилення в зоні кільцевих тріщин.

Список літератури:

1. About [Electronic resource] / KGTM Kelley GasTransportModules. – Available at: \www/URL: <http://kelleygtm.com/about/>
2. Джус А. П. Особливості використання комбінованих ємностей для транспортування стисненого природного газу (CNG) морськими акваторіями [Текст] / А. П. Джус // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 1(54). – С. 34-40.
3. Пелех Б. Л., Сухорольский Н. А. Контактные задачи теории упругих анизотропных оболочек. – Киев: Наукова думка, 1980. – 216 с.
4. Григолюк Э. И., Толкачев В. М. Контактные задачи теории пластин и оболочек. – М.: Машиностроение, 1980. – 411 с.
5. Львов Г. И. О влиянии кинематических гипотез на характер контактного взаимодействия цилиндрической оболочки с бандажом [Текст] / Г. И. Львов, А. Н. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2006. – № 32. – С. 98-104.
6. Бесчетников Д. А. Контактная задача для цилиндрической оболочки с бандажом из композитного материала [Текст] / Д. А. Бесчетников, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2012. – № 67(973). – С. 19-25.
7. Мужецкий А. И. Особенности моделирования изделий из волокнистых полимерных композиционных материалов методом конечных элементов [Текст] / А. И. Мужецкий, В. А. Колесник, А. В. Евтухов // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17-20 квітня 2012 р.: у 3-х ч. / Ред. кол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми: СумДУ, 2012. – Ч. 1. – С. 53-54.
8. Егоров Д. В. Особенности конечно-элементного моделирования изделий из композитных материалов в космической технике [Текст] / Д. В. Егоров, Д. Ф. Баляков, Н. Н. Широкова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – № 10. – С. 27-28.
9. Алямовський А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
10. Мандрик О. М. Розвиток наукових основ підвищення рівня екологічної безпеки при транспортуванні природного газу: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01 / Мандрик Олег Миколайович. – Івано-Франківськ, 2013. – 336 с.
11. Дария заде С. Численная методика определения эффективных характеристик однонаправленно армированных композитов гексагональной структуры [Текст] / С. Дария заде, Г. И. Львов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 2(109). – С. 59-66.
12. Чеботарева Е. А. Полимерные композиционные материалы: формирование структуры и влияние ее на свойства (Обзор) [Текст] / Е. А. Чеботарева, Л. Р. Вишняков // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – № 2. – С. 157-163.

Джус А.П.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация

В статье приведены результаты исследований особенностей напряженно-деформированного состояния элементов комбинированных сосудов высокого давления. Установлено, что образование кольцевых трещин, обусловленных потерей целостности композитного усиления, приводит к увеличению уровня осевых и окружных напряжений в крайних участках цилиндрической части металлического лейнера. Характер деформаций этих участков является таким, что будет способствовать росту уровня напряжений и образованию трещин в металле в условиях его коррозионного повреждения.

Ключевые слова: комбинированные сосуды высокого давления; композитное усиления; металлический лейнер, напряжение.

Dzhus A.P.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

RESEARCH STRESS-STRAIN CONDITION OF ELEMENTS OF COMBINED HIGH PRESSURE VESSELS

Summary

The article contains results the features of stress-strain state elements combined pressure vessel. Established that formation of circular cracks caused by the loss of integrity of composite reinforcement, increases the level of axial and circular stresses in the extreme sections of cylindrical metal Leiner. The nature of the deformation of these sites is one that will boost the level of stress and cracking in metal under conditions of corrosive damage.

Keywords: composite pressure vessels; composite reinforcement; metal Leiner, tension.

УДК 004.42:617.7

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ОЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Кривошеєв К.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Дала

Проведено аналіз існуючих моделей, методів та інформаційних технологій діагностики просторової контрастної чутливості. Запропоновано нову комп'ютерну діагностику на основі фізіологічної структури сітківки ока. Розроблено метод відображення графічних стимулів для діагностики. Удосконалено алгоритм розмиття за Гаусом для задачі, що розв'язується. Подальший розвиток набула модель постановки діагнозу в умовах невизначеності.

Ключові слова: модель, інформаційна технологія, просторова контрастна чутливість, діагностика зору, система підтримки прийняття рішень.

Постановка проблеми. Сучасний спосіб життя призводить до погіршення діяльності багатьох систем і органів людини. Саме тому, високий рівень досягнень у сфері математичного моделювання, новітніх інформаційних технологій (ІТ) та апаратного забезпечення доцільно використовувати для підвищення якості діагностики, лікування та профілактичного спостереження.

Великий темп життя вимагає більш швидкого аналізу стану здоров'я людини: з позиції пацієнта, актуальним є відсутність якісних ІТ, що надають можливість провести первинний огляд без

лікаря або порадитися з ним не виходячи з дому чи офісу; з боку лікаря – велике навантаження призводить до розгляду усіх випадків захворювання однаково та не дозволяє зосередитися на ускладнених випадках захворювання [2, с. 368].

Розробка ІТ медичного призначення, а саме, систем підтримки прийняття рішень (СППР), дозволяють подолати перешкоди на шляху встановлення правильного діагнозу, скоротити час обстеження та надати лікарю необхідну інформаційну підтримку. Така підтримка найбільш актуальна при проведенні первинного огляду. Прикладом може бути проведення планового огляду