

УДК 677.017.636

ЩУЦЬКА Г. В.¹, СУПРУН Н. П.², ПОЖИЛОВ–НЕСМІЯН Г. М.²

¹ Київський коледж легкої промисловості

² Київський національний університет технологій та дизайну

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В БАГАТОШАРОВИХ АПЛІКАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мета. Для прогнозування цілеспрямованого транспорту ліків визначеної ефективної концентрації в осередок ураження, виходячи із геометричних параметрів ран, провести моделювання процесів вологопереносу в багатошарових аплікаційних матеріалах медичного призначення.

Методика. Засобами цифрової фотографії з подальшою обробкою зображення в комп'ютерному середовищі розроблені методи проектування тривимірних ефектів розповсюдження рідини в багатошарових пакетах матеріалів медичного призначення.

Результати. Встановлено, що сучасні ранові покриття представляють собою багатошарові багатовимірні композиції із складною кінетикою розповсюдження рідини. Крім того, самі рани на тілі людини мають складну просторову геометричну форму. Це потребує врахування об'ємних ефектів при аналізі та прогнозуванні процесів змочування й розповсюдження рідини в таких системах. Запропоновано алгоритм порядку визначення границь рани засобами цифрової фотографії з подальшою обробкою зображення рани в комп'ютерному середовищі. Для оцінки вологотранспортних властивостей з метою контрольованого вивільнення лікувальних речовин у необхідній концентрації в різних шарах пакетів ранових покриттів проведено експеримент при змочуванні з двох і трьох джерел з подальшим тривимірним моделюванням. Експериментально встановлено, що параметри поширювання рідкої вологи в багатошарових перев'язочних матеріалах значно розрізняються. Результати проведеного моделювання придатні для прийняття оперативних рішень щодо вибору типу, необхідних геометричних параметрів медичних матеріалів і ранових покриттів.

Наукова новизна. Запропонована методика встановлення реальної геометрії рани разом з тривимірним моделюванням дає змогу прогнозувати точні границі нанесення медичного засобу, розрахувати його необхідну кількість і час руху до рани. З використанням тривимірної комп'ютерної графіки дискретних об'єктів розроблено методи, які дозволяють прогнозувати умови надійного функціонування багатошарових перев'язувальних матеріалів.

Практична значимість. Досліджені процеси транспорту і розповсюдження рідкої вологи можуть бути використані при виборі компонентів сировинного складу, структури і кількості шарів багатошарових ранових покриттів з урахуванням реального геометричного профілю рани.

Ключові слова: багатошарові аплікаційні матеріали, вологоперенесення, геометрія рани, тривимірне моделювання.

Вступ. Розробка нових аплікаційних матеріалів медичного призначення є перспективним і важливим напрямком як в текстильній промисловості, так і в медицині. Світовий ринок перев'язувальних засобів зростає дуже швидкими темпами - об'єм продаж на ньому у 2018 році досяг 8,63 млрд. доларів США, і, як передбачається, до 2026 року складе 13,94 мільярда доларів, збільшуючись на 6,14% з 2019 до 2026 року [1]. Основними факторами прискорення світових темпів виробництва ранових покриттів та різних перев'язувальних матеріалів є старіння населення, яке супроводжується поширенням хронічних захворювань, підвищення обізнаності пацієнтів та збільшення витрат на охорону здоров'я, зростання числа дорожньо-транспортних пригод та випадків ранової інфекції, збільшення інвестування в медицину в країнах з економікою, що розвивається. Слід зазначити, що згідно аналізу, проведеного оглядачами відомої компанії Fast Market Research [1], основна частка зростання

(до 77%) загального ринку ранових пов'язок припадає на сегмент сучасних високотехнологічних перев'язувальних засобів (advanced wound dressings), які представляють собою багатофункціональні системи, що вирішують ряд лікувально-терапевтичних задач. Рациональна тактика використання нового покоління покриттів для ран складається в забезпеченні їх поліфункціональної дії – адресної доставки ліків необхідної концентрації в місце порушення цілісності покривних тканин при мінімізації їх накопичування у неущкоджених тканинах та органах, та забезпечення відтоку ексудату.

В Україні зараз існує підвищений попит на сучасні ранові покриття, між тим, як представлені вони переважно імпортними товарами, які мають високу ціну. Розроблення перев'язувальних засобів із заданими волого-транспортними властивостями є перспективним і важливим напрямком, який надасть змогу розширити асортимент вітчизняних товарів на ринку медичних виробів, сприятиме скороченню терміну перебування хворих в медичних закладах, матиме суттєвий вплив на кінцеву вартість лікування пацієнтів і якість їх життя.

Постановка завдання. Найчастіше сучасні ранові пов'язки представляють собою складні багатошарові композиції, в яких комбінуються текстильні матеріали різної хімічної природи і фізичної форми. Кінетика розповсюдження рідини в таких системах може значно ускладнюватися. Крім того, самі рани на тілі людини мають складну просторову геометричну форму. Тому неврахування об'ємних ефектів при аналізі та прогнозуванні процесів змочування та розтікання рідини в таких системах може призвести до значних похибок. Аналіз вимог до сучасних перев'язувальних засобів для загоювання ран [2 - 8] свідчить про те, що їх основними функціями є (Рис.1) здатність ефективно видаляти надлишок ранового ексудату та продуктів метаболізму 1, сприяти створенню оптимального середовища для природного процесу загоєння ран 2, захищати рану від механічних ушкоджень і запобігати її вторинному інфікуванню 3.

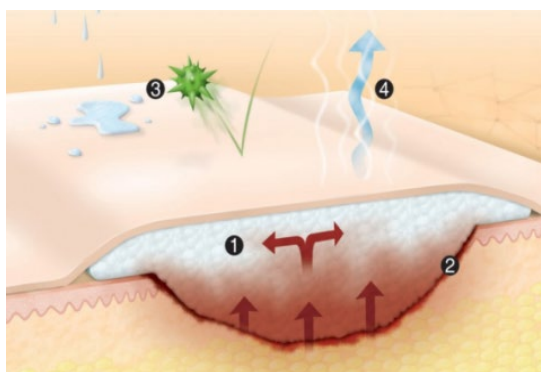


Рис.1. Об'ємна модель ранової пов'язки

Розповсюдження рідини у вигляді руху по товщині або площині матеріалів медичного призначення розглядалися [9,10] в одно- або двовимірній постановці. Однак, зважаючи на те, що сучасні перев'язувальні матеріали, як правило, є поліфункціональними і складаються із декількох шарів (верхній шар захищає рану від інфекцій, нижній - покриває рану, між ними знаходиться проміжний шар, який виконує сорбційну функцію), виникає необхідність використання багатовимірних моделей для прогнозування процесів масопереносу.

Наявність надійної моделі надає змогу застосовувати активний контроль, передбачити розміри змоченої зони і прогнозувати якість та ефективність аплікаційних виробів з досліджуваних матеріалів. Правильне визначення геометричних параметрів ран і, відповідно, параметрів ранового покриття, може значно підвищити ефективність його використання, прискорити одужання, знизивши при цьому вартість лікування.

Метою даної роботи є прогнозування інтенсивності процесів внутрішнього переміщення вологи в багатошарових пакетах матеріалів медичного призначення, встановлення границь змочених зон та подальшого тривимірного моделювання процесу.

Результати досліджень. Тіло людини є дуже складним геометричним об'єктом, що визначається десятками розмірних характеристик. Також надзвичайно різноманітними є геометричні параметри ран і травм і місця їх розташування на тілі. У роботі розв'язується технічна задача проектування матеріалів для ранових покриттів. З цієї точки зору рана – це геометрична фігура, яка має границю замкненої форми. Ця границя може бути зображена в довільній плоскій системі координат. Для моделювання подібних кривих зручно використовувати полярні системи координат, у якій координатами є кут φ і радіус вектор ρ розташування певної точки (Рис.2).

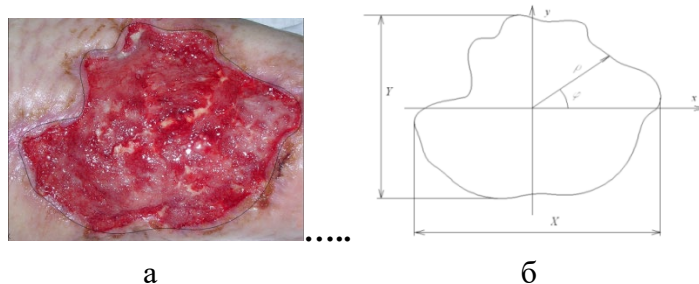


Рис. 2. Рана (а) та її границі у декартових і полярних координатах (б)

Пропонується наступний алгоритм порядку визначення границь рани:

- рана фотографується засобами цифрової фотографії;
- у комп'ютерному середовищі зображення рани обробляється у зручний для аналізу спосіб;
- визначаються максимальні поздовжні X і поперечні Y розміри рани. Нами для цих цілей використовувалось програмне середовище AutoCAD 2016;
- визначаються координати ряду точок в обраній системі координат. Визначені точки перераховуються в полярні координати за формулами.

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad \varphi_i = \arctg \frac{y_i}{x_i}$$

Одержану криву можна апроксимувати у вигляді ступеневого, тригонометричного ряду або системою сплайнів.

Розроблений алгоритм дає змогу визначити динаміку об'ємного проходження ексудату крізь тривимірну пов'язку з урахуванням реальної геометрії рани (Рис.3,а), що дозволяє розв'язувати задачі довговічності функціонування пов'язок. У якості показника, який характеризує термін використання ранового покриття, може бути відсутність вологої плями або обмеження площі поширення ексудату на його зовнішній поверхні. У випадку

використання пов'язки для транспортування лікарських засобів до рани може бути розв'язана задача визначення зони первинного нанесення засобу на поверхню матеріалу медичного призначення, виходячи з реальної геометрії рани. На рис. 3,б показана реальна тривимірна поверхня розповсюдження лікарської рідини при її русі через матеріал медичного призначення до рани.

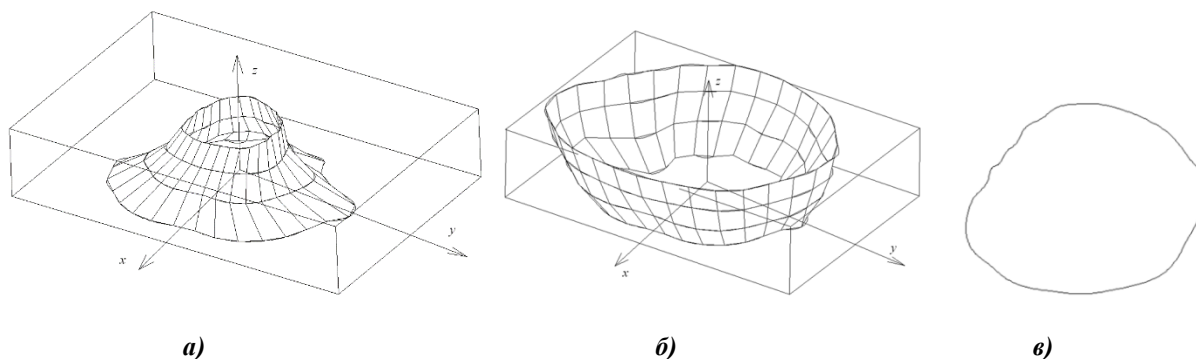


Рис.3. Модель видалення ексудату з рани при використанні багатошарового ранового покриття (а), постачання лікувального матеріалу до рани (б), необхідна конфігурація розташування лікувального препарату в рановому покритті (в)

3D моделювання з урахуванням геометрії рани надає змогу прогнозувати необхідну конфігурацію нанесення лікувального препарату на пов'язку (рис.3, в), його кількість і час трансферу до рани. Все це можна використовувати для прийняття оперативних рішень щодо вибору типу, розміру, товщини ранового покриття, кількості лікарського матеріалу та способу його нанесення.

Методика оцінки особливостей переносу рідкої вологи в різних шарах композиційної структури ранового покриття полягає у наступному. На верхній шар багатошарового пакету наносилась крапля підфарбованої дистильованої води, після чого пакет пошарово розділявся і в кожному із шарів визначалась форма і площа змоченої зони. Кількість проб для досліджень визначалась, виходячи з заданої гарантійної похибки коефіцієнта варіації 5 – 8%.

Необхідність використання тривимірних моделей для аналізу сорбційних процесів в багатошарових аплікаційних покриттях зумовлена наступними міркуваннями. У ранових виразках, як правило, існує декілька джерел, з яких з різною інтенсивністю виділяється ексудат. З іншого боку, сама форма рани зумовлює складну геометрію зони розповсюдження рідин (видалення ексудату, транспорт лікарських препаратів) яку, у загальному випадку, можна апроксимувати замкненою кривою. Порівняно великі товщини сучасних ранових пов'язок також мають бути враховані при описанні сорбційних процесів в таких системах.

Для оцінки вологотранспортних властивостей в багатошарових ранових покриттях проведено експеримент при змочуванні з двох і трьох джерел з подальшим тривимірним моделюванням, результати якого наведені на рис.4.

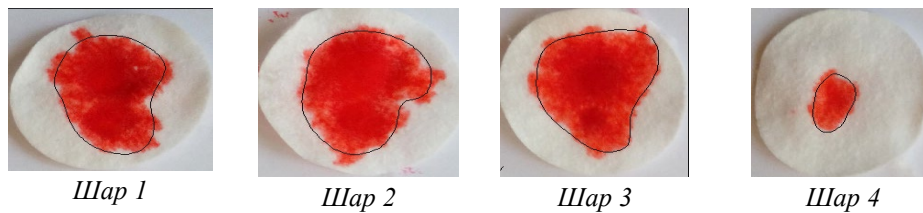


Рис.4. Розповсюдження рідини в шарах багат шарового ранового покриття при змочуванні з двох джерел

Концентрацію рідини u на поверхні матеріалу при дії окремих джерел з інтенсивністю зволоження P можна виразити, згідно [7], як:

$$u_1(x, y) = P_1 \cdot e^{-k \cdot (x^2 + y^2)}, \quad u_2(x, y) = P_2 \cdot e^{-k \cdot ((x-x_2)^2 + y^2)},$$

Для двох джерел концентрація рідини на поверхні може бути розглянута, як суперпозиція:

$$u(x, y) = u_1(x, y) + u_2(x, y).$$

Графічно така залежність може бути виражена у вигляді, представленому на рис. 5, а. Границю змоченої зони визначимо, як залежність $g(x, y)$ з умови досягнення концентрації мінімального значення:

$$\delta = P_1 \cdot e^{-k \cdot (x^2 + y^2)} + P_2 \cdot e^{-k \cdot ((x-x_2)^2 + y^2)}.$$

Залежність концентрації для трьох координат в просторовому випадку, враховуючи функцію розповсюдження по глибині $f(z)$, знайдену в [7], може бути записана як:

$$u(x, y, z) = \left(P_1 \cdot e^{-k \cdot (x^2 + y^2)} + P_2 \cdot e^{-k \cdot ((x-x_2)^2 + y^2)} \right) \cdot f(z).$$

Звідси, поверхня зони зволоження при дії двох джерел може бути представлена у вигляді (рис.5,в).

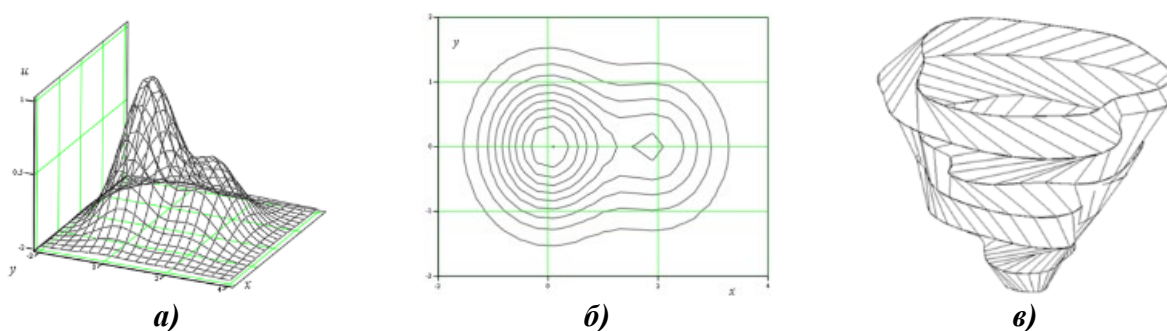


Рис.5. Модель зони змочування в багат шаровому матеріалі при двох джерелах змочування: а- концентрація рідини на поверхні; б- кола розповсюдження рідини в різних шарах; в- поверхня змочування

При дії трьох джерел змочування конфігурація зони розповсюдження рідини змінюється, що викликає зміни і поверхні змочування (Рис. 6).

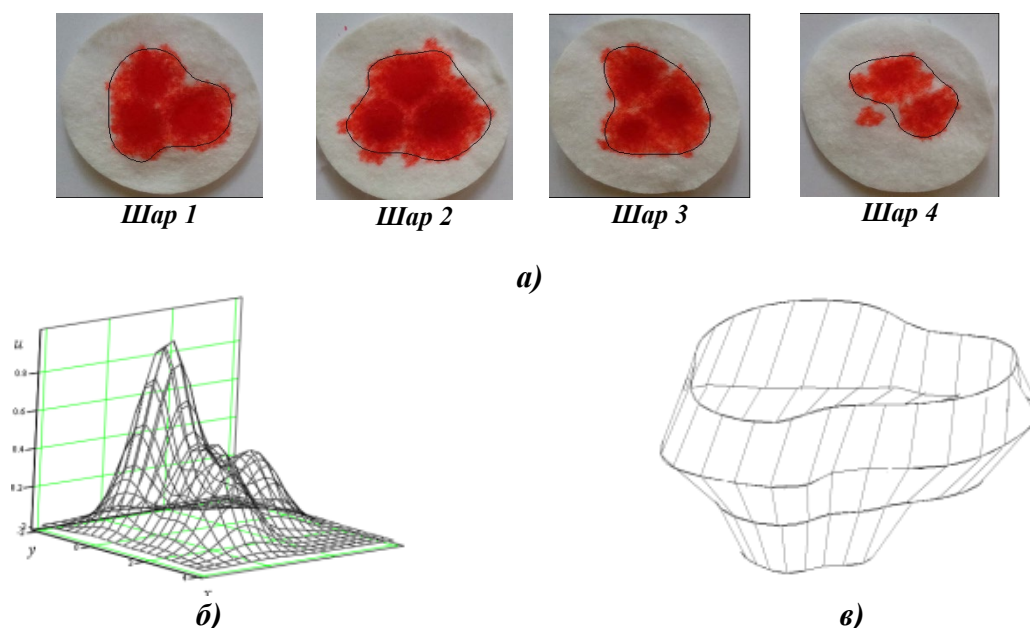


Рис.6. Змочена зона в багатошаровому матеріалі при трьох джерелах змочування: а - розтікання рідини в шарах ранового покриття, б - концентрація рідини на поверхні, в - поверхня змочування

Висновок. Результати проведеного моделювання придатні для прийняття оперативних рішень щодо вибору типу, необхідних геометричних параметрів медичних матеріалів і ранових покриттів. Використання методів визначення концентрацій при трансфері лікувальних препаратів до рани дозволяє проводити вибір компонентів сировинного складу і структури багатошарових ранових покриттів, встановити кількість лікувального препарату і спосіб його нанесення і подачі, виходячи з вимог лікувального процесу, визначати час функціонування матеріалів медичного призначення з урахуванням реальних геометричних параметрів рани.

Література

1. Wound Care Market by Product (Foams, Hydrocolloids, Alginates, Antimicrobial Dressings, Assessment, NPWT Devices, Substitutes, Sutures, Staples, Tapes), Wound (Surgical, Trauma, Diabetic Ulcers, Burns), End-User, Region - Global Forecast to 2024/ www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/woundCare
2. Thomas S. Wound management and dressings. London: The Pharmaceutical Press. 1990. 326 P.
3. Коваленко О. М. Сучасні ранові покриття (огляд). *Сучасні медичні технології*. 2010. № 4, с.88-97.
4. Абаев Ю.К. Раневые повязки в хирургии. *Медицинские новости*. 2003. №12. с.56-58.
5. Andreu V., Mendoza G., Arruebo M., S. Irusta S. Smart Dressings Based on

References

1. Wound Care Market by Product (Foams, Hydrocolloids, Alginates, Antimicrobial Dressings, Assessment, NPWT Devices, Substitutes, Sutures, Staples, Tapes), Wound (Surgical, Trauma, Diabetic Ulcers, Burns), End-User, Region - Global Forecast to 2024/ www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/woundCare. [in English].
2. Thomas S. Wound management and dressings. London: The Pharmaceutical Press. 1990. 326 P. [in English].
3. Kovalenko O. M. Suchasni ranovi pokryttya (ohlyad). *Suchasni medychni tekhnolohiyi*. 2010. № 4, p.88-97 [Modern wound coverings (review)] [in Ukrainian].
4. Abayev Y.K. [Wound dressings in surgery] *Ranevye povyazki v khirurgii. Meditsynskiye novosti*. 2003. №12. P.56-58.[in Russian]
5. Andreu V., Mendoza G., Arruebo M., S. Irusta S. Smart Dressings Based on Nanostructured Fibers

Nanostructured Fibers Containing Natural Origin Antimicrobial, Anti-Inflammatory and Regenerative Compounds. *Materials (Basel)*. 2015. № 8. P. 5154–5193.

6. Turner T.D. Advances in wound management /T.D. Turner, R.J. Schmidt, K. G. Harding. – London: John Wiley&Sons, 1986. 149 P.

7. Sood A. Wound Dressings and Comparative Effectiveness Data / Sood A., Granick M., Tomaselli N. *Adv. Wound Care (New Rochelle)*. 2014. № 8. P. 511–529.

8. Винник Ю.С., Маркелова Н.М., Соловьева Н.С., Шишацкая Е.И., Кузнецов М.Н., Зуев А.П. Современные раневые покрытия в лечении гнойных ран. *Новости хирургии*. 2015. Том 23. № 5. С.552-558.

9. Щуцка Г.В., Супрун Н.П. Вологоперенос в багатопарових перев'язочних засобах. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки» 2018. № 5 (126). С. 63–71.

10. Щуцка Г. В., Супрун Н. П. Особливості розробки виробів медичного призначення з заданими вологотрансферними властивостями. Монографія. Київ. КНТУД. 2018. 250 с.

Containing Natural Origin Antimicrobial, Anti-Inflammatory, and Regenerative Compounds. *Materials (Basel)*. 2015. № 8. P. 5154–5193. [in English].

6. Turner T.D. Advances in wound management /T.D. Turner, R.J. Schmidt, K. G. Harding. – London: John Wiley&Sons, 1986. 149 P. [in English].

7. Sood A. Wound Dressings and Comparative Effectiveness Data / Sood A., Granick M., Tomaselli N. *Adv. Wound Care (New Rochelle)*. 2014. № 8. P. 511–529. [in English].

8. Vinnik YU.S., Markelova N.M., Solov'yeva N.S., Shishatskaya Ye.I., Kuznetsov M.N., Zuyev A.P. Sovremennyye ranevyye pokrytiya v lechenii gnoynykh ran [Modern wound dressings in the treatment of purulent wounds] *Novosti khirurgii*. 2015. Tom 23. № 5. P.552-558. [in Russian]

9. Shchuts'ka H.V., Suprun N.P. Volohoperenos v bahatosharovykh perev'yazochnykh zasobakh. [Moisture transfer in multilayer dressings.] *Visnyk Kyiv National University of Technologies & Design – Bulletin of the KNUTD*. 2018. № 5 (126). P. 63–71. [in Ukrainian].

10. Shchuts'ka H. V., Suprun N. P. [Peculiarities of development of medical products with given moisture transfer properties] *Osoblyvosti rozrobky vyrobiv medychnoho pryznachennya z zadanyymi volohotransfernymi vlastyvostyamy*. Monohrafiya. Kyiv. KNTUD. 2018. 250 P. [in Ukrainian].

SHCHUTSKA G.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7182-8556>
Researcher ID: [57190428341](https://orcid.org/57190428341)
Kyiv College of Light Industry

SUPRUN NATALIYA

suprun.knutd@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3937-8399>
Researcher ID: 6701785670
Kyiv National University of Technologies & Design

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА В МНОГОСЛОЙНЫХ АППЛИКАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ЩУЦКАЯ А. В.¹, СУПРУН Н. П.², ПОЖИЛОВ-НЕСМИЯН Г. М.²

¹Київський коледж легкої промисловості

²Київський національний університет технологій та дизайну

Цель. Для прогнозирования целенаправленного транспорта лекарств определенной эффективной концентрации в очаг поражения, исходя из геометрических параметров ран, провести моделирование процессов влагопереноса в многослойных аппликационных материалах медицинского назначения.

Методика. Средствами цифровой фотографии с последующей обработкой изображения в компьютерной среде разработаны методы проектирования трехмерных эффектов распространения жидкости в многослойных пакетах материалов медицинского назначения.

Результаты. Установлено, что современные раневые покрытия представляют собой многослойные многомерные композиции со сложной кинетикой распространения жидкости. Кроме того, сами раны на теле человека имеют сложную пространственную геометрическую форму. Это требует учета объемных эффектов при анализе и прогнозировании процессов смачивания и

растекания жидкости в таких системах. Предложен алгоритм порядка определения границ раны средствами цифровой фотографии с последующей обработкой изображения раны в компьютерной среде. Для оценки влаготранспортных свойств с целью контролируемого высвобождения лекарственных веществ в необходимой концентрации в различных слоях пакетов раневых покрытий был проведен эксперимент при смачиванию из двух и трех источников с последующим трехмерным моделированием. Экспериментально установлено, что параметры послойного распространения жидкой влаги в многослойных перевязочных материалах значительно различаются. Результаты проведенного моделирования могут быть использованы для принятия оперативных решений по выбору типа, необходимых геометрических параметров медицинских материалов и раневых покрытий.

Научная новизна. Предложенная методика установления реальной геометрии раны с трехмерным моделированием позволяет прогнозировать точные границы нанесения медицинского средства, рассчитать его необходимое количество и время движения к ране. С использованием трехмерной компьютерной графики дискретных объектов разработаны методы, позволяющие прогнозировать условия надежного функционирования многослойных перевязочных материалов.

Практическая значимость. Исследованные процессы транспорта и распространения жидкой влаги могут использоваться при выборе компонентов сырьевого состава, структуры и количества слоев многослойных раневых покрытий с учетом реального геометрического профиля раны.

Ключевые слова: многослойные аппликационные материалы, влагоперенос, геометрия раны, трехмерное моделирование.

MODELING OF MOISTURE TRANSFER PROCESSES IN MULTILAYER MEDICAL APPLICATION MATERIALS

SHCHUTSKA G. V^{1.}, SUPRUN N. P.², POZHILOV-NESMIYAN G. M.

¹Kyiv College of Light Industry

²Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. To carry out modeling of moisture transfer processes in multilayer medical application materials for forecasting of targeted transport of drugs of a certain effective concentration into the lesion center, based on the geometric parameters of the wounds.

Methodology. Using digital image processing techniques in a computer environment have developed methods for designing three-dimensional fluid propagation effects in multilayer medical wound dressings.

Findings. Modern wound dressings have been found to be multilayer multidimensional compositions with complex fluid kinetics. Additionally, the wounds on the human body itself have a complex space geometric shape. This requires taking into account the volumetric effects when analyzing and forecasting the processes of wetting and fluid flow in such systems. An algorithm for ordering the boundary of a wound by digital photography with the subsequent processing of a wound image in a computer environment is proposed. To evaluate the moisture transport properties for the controlled release of medicinal substances at the desired concentration in different layers of wound dressings, an experiment was made with wetting from two and three sources, followed by three-dimensional modeling. It has been experimentally found that the parameters of the layered distribution of liquid moisture in multilayer dressings vary significantly. The results of the simulation are suitable for making prompt decisions about the type, the required geometric parameters of medical materials and wound dressings.

Scientific novelty. The proposed method of establishing the real geometry of the wound, together with three-dimensional modeling, allows to predict the exact boundaries of the application of the drug, to calculate its required amount and time of movement to the wound. Using 3D computer graphics of discrete objects, methods have been developed to predict the conditions for the reliable functioning of multilayer dressings.

Practical value. Investigated processes of transport and distribution of liquid moisture can be used in the selection of components of the raw material composition, structure and number of layers of multilayer wound dressings, taking into account the real geometric profile of the wound.

Keywords: multilayer application materials, moisture transfer, wound geometry, three-dimensional modeling.