

УДК 617-7 + 616-72

ЕЛЕКТРОДИ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ЛЕГЕНЬ

Понов С. В.

meastrojoshi@gmail.com

Лебедєв О. В.

biowelding@gmail.com

кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут Імені Ігоря Сікорського»

м. Київ, Україна

Реферат – *Проблематика.* В порівнянні з іншими тканинами, до яких застосовують метод високочастотного зварювання, модуль Юнга та еластичність легень нижчі, а імпеданс вищий, що змушує прикладати додаткових навантажень на легень та збільшувати напругу для досягнення успішного високочастотного зварювання легень.

Мета. Обґрунтування форми та характеристик електродів за результатами досліджень теплового, механічного та електричного впливу на тканину легень при моделюванні процесу їх зварювання.

Методика реалізації. Для досягнення поставленої мети використовували середовище автоматизованого проектування SOLIDWORKS із його пакетами доповнення SOLIDWORKS Simulation для симуляції протікання механічних процесів та EMS SOLIDWORKS для симуляції протікання теплових та електромагнітних процесів при зварюванні тканини легень. У симуляції використовувались комп'ютерні 3D-моделі-аналоги паренхіми легень та електродів різних форм.

Результати. Виконано симуляції процесу високочастотного електрозварювання моделі паренхіми легень та отримано результати протікання механічних, теплових та електричних процесів у тканині паренхіми. Так, значення тиску на тканину, її стиснення та часу нагрівання до температур високочастотного зварювання для: плоских електродів рівні 5026 Н/м², 33,9 мм та 7,5 секунди; електродів з прямокутними виступом та канавкою рівні 7417 Н/м², 36,55 мм та 2,5 секунди; електродів з трикутними канавкою та виступом рівні 4889 Н/м², 34,44 мм та 15 секунд; електродів з квадратними виступом та канавкою рівні 4976 Н/м² та 32,15 мм. Тканина паренхіми добре входить в канавки прямокутного та трикутного електроду, проте погано в електрод з квадратною канавкою, тому останній був виключений з аналізу в пакеті EMS.

Висновки. В результаті виконання даної роботи отримано моделі електродів різних форм для інструменту для зварювання легень, значення питомого тиску на тканину, переміщення тканини та розподіл температури тканини в часі. На основі цих даних було визначено найкращу форму електродів – з прямокутними канавками. Також були створені файли моделей та досліджень, на основі яких можна проводити дослідження на будь-яких файлах електродів і біологічних тканин, які підтримуються програмою SOLIDWORKS.

Ключові слова – Електроди, електропровідність, комп'ютерна симуляція, легень, роз'єднання, температура, тиск.

I. ВСТУП

Метод високочастотного роз'єднання живих тканин заснований на ефекті електротермічної денатурації білків. При впливі високочастотного струму невисокої напруги білкова рідина денатурує. Далі відбувається згортання білків у шві та тканини злипаються. Температура для ефективного з'єднання і денатурації білка важлива, вона повинна сягати приблизно 65-85 °С.

Цей метод має ряд переваг над іншими методами роз'єднання легень:

- прецизійний гемостаз та аеростаз;
- герметичність шва;

- відсутність сторонніх предметів на місці шва, мінімальні пошкодження та відсутність некрозів та інфекцій;
- короткий період реабілітації;
- мінімальна карбонізація тканин;
- значна економія операційного і шовного матеріалу, наприклад зменшення використання марлі з 10-100 метрів до 3-7;
- дешевизна та надійність.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є обґрунтування форми та характеристик електродів за результатами досліджень теплового, механічного та електричного впливу на тканину легень при моделюванні процесу їх зварювання.

III. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для досягнення поставлених задач було обране середовище автоматизованого проектування SOLIDWORKS через такі характеристики:

- повна асоціативність між проектною моделлю та імітаційною моделлю, тому будь-які зміни в проекті автоматично оновлюються в імітаційній моделі;
- потужна підтримка даних САПР: властивості дизайну стають інженерними властивостями для продуктивного та плавного робочого процесу, такими як властивості матеріалів, кріплення, автоматичне розпізнавання області текучості та розпізнавання топології геометрії для визначення сітки тривимірної моделі;
- загальний інструмент комунікації з eDrawings дозволяє легко передавати результати моделювання всім зацікавленим сторонам проекту [1].

Також використовувався зовнішній пакет доповнення Electro-Magnetic Simulation для SOLIDWORKS. Він відрізняється від вбудованих функцій електричного, магнітного та теплового моделювання проходження відповідних процесів тим, що дозволяє об'єднати перераховані процеси в одне взаємопов'язане дослідження та більш детально налаштовувати початкові умови та перехідні процеси чи зовнішні впливи більш детально [2].

В бібліотеці матеріалів SOLIDWORKS відсутні характеристики моделі живої тканини, тому необхідно створити такі. Механічні, теплові та електричні характеристики паренхіми легень наступні:

Таблиця 1 – Біофізичні властивості паренхіми легень

Тканина	Паренхіма легені
Модуль Юнга	5000 Па [3, 4]
Густина	394 кг/м ³ [5]
Питома теплоємність	3886 Дж/кг*К [6]
Теплопровідність	0,39 Вт/м*К [7]
Відносна діелектрична проникність	2580 [8-11]
Електропровідність	0,107 См/м [8-11]

IV. ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

В системі проектування SOLIDWORKS було змодельовано такі електроди (рис. 1):

- плоский, з розмірами 80x10x10 мм;
- електрод з прямокутним виступом з розмірами профілю 7x1 мм;
- електрод із трикутним виступом на 1 мм з кутом нахилу 45°;
- електрод з квадратним виступом зі стороною профілю 1 мм.

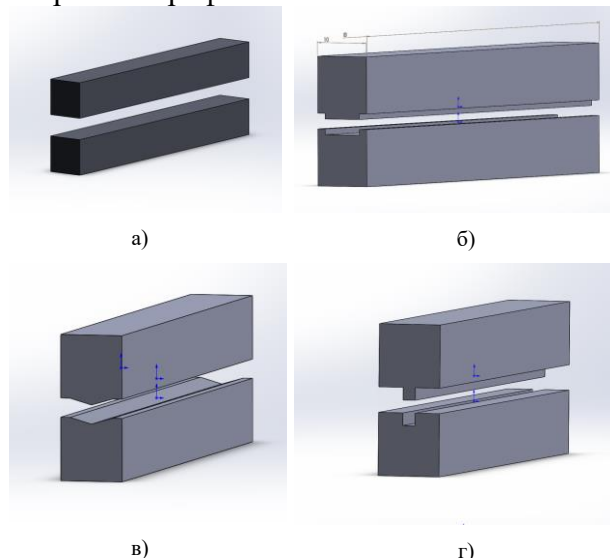


Рис. 1. Зовнішній вигляд створених електродів: а) плоских; б) з прямокутними канавкою та виступом; в) з трикутними канавкою та виступом; г) з квадратними канавкою та виступом

Першим етапом у процесі високочастотного зварювання тканини є її механічне повне стиснення електродами для досягнення значень питомого тиску на тканину близьких до її модуля Юнга. Важливо не перевищувати питомий тиск на паренхіму легені, так як в такому разі відбувається не високочастотне зварювання, а її фізичне розрізання з виділенням крові [7].

Дослідження на статичне навантаження проводилось в пакеті SOLIDWORKS Simulation 2017. Дослідним матеріалом слугувала паренхіма легені розмірами 60x60x40 мм. Досліджуваними параметрами були максимальне стиснення тканини, питомий тиск на тканину та тиск на тканину. Тиск на тканину дослідним шляхом був обраний 5Н. Матеріалами електродів стала сталь марки 1.4301 – це марка сталі, яка використовується в медицині та має національне маркування 12X18H10. В SOLIDWORKS відсутня біологічна тканина паренхіма легені, тому для її використання був створений новий матеріал «Паренхіма легені».

Для проведення дослідження, із застосуванням функції «Умови сполучення» паренхіма легені була розташована по центру між електродами. Така конфігурація застосовувалась для всіх електродів.

Перед початком дослідження були виконані такі дії: тривимірним моделям були надані властивості сталі 1.4301 та паренхіми легень, прикладена сила до одного з електродів, рівна 5 Н, який буде стискати тканину, кріпленнями зафіксований інший електрод та взаємний контакт тіл встановлений «Без проникнення».

Другим етапом у процесі високочастотного зварювання тканини є пропускання через неї високочастотного струму 66 кГц із подальшим нагріванням тканини. Для процесу зварювання потрібно досягти температури в тканині рівною 60-80 °С.

Електромагнітне та теплове дослідження проводилось в доповненні EMWorks для SOLIDWORKS. Досліджуваним параметром в даному випадку є температура тканини. Для всіх досліджень до електродів застосовувалась різниця напруг рівна 50 В, початкова температура електродів рівна 24 °С, паренхіми легень 36,6 °С, а час проведення процесу зварювання становить 25 секунд. Так як тканина паренхіми володіє електричними властивостями, які змінюються в залежності від частоти струму, то були вибрані такі діелектричні характеристики, які відповідають частотам 50-100 кГц.

Дослідження проводились на плоских електродах, електродах з прямокутними та трикутними канавками та виступами, так як електроди з квадратними виступом та канавкою були виключені з дослідження. Досліджувалась стиснена після першого етапу процесу електрозварювання тканина паренхіми.

V. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Після того як всі необхідні початкові умови були задані, було запущено процес дослідження на статичне навантаження плоского електроду на паренхіму легені з силою 5 Н та отримано результати, наведені на рис. 2-3.

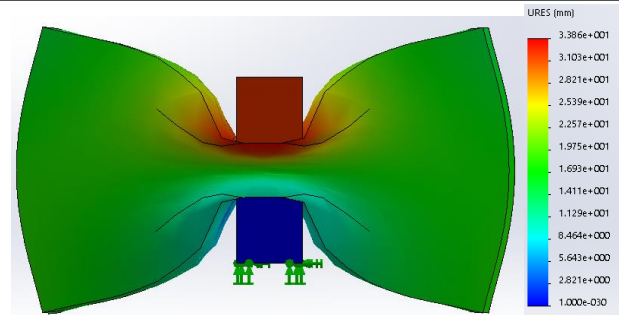


Рис. 2. Епюра стиснення паренхіми легені

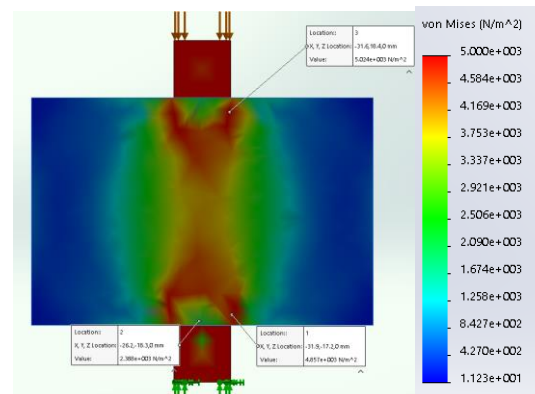


Рис. 3. Епюра розподілу тиску на паренхіму легені

На рис. 4-6 приведено результати стиснення паренхіми легені електродами із прямокутним виступом 7x1 мм та відповідною канавкою із силою 5Н.

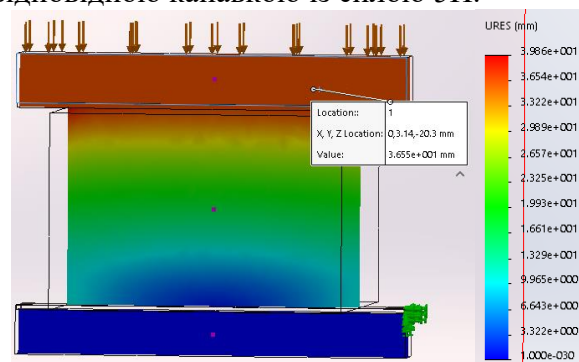


Рис. 4. Епюра переміщення паренхіми легені

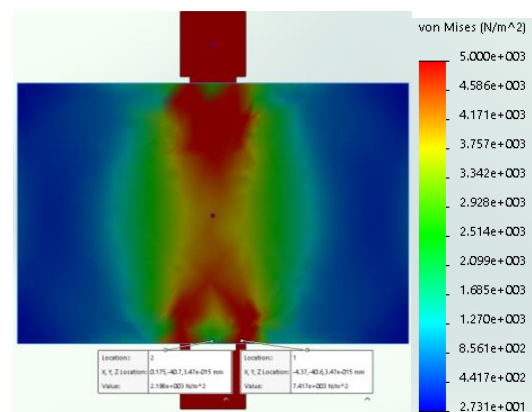


Рис. 5. Епюра розподілу тиску на паренхіму легені

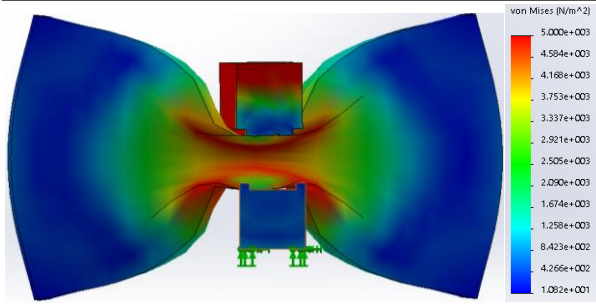


Рис. 6. Епюра входження тканини легені в канавку електрода

На рис. 7-9 приведено результати стиснення паренхіми легені електродами із квадратним виступом зі стороною 1 мм та канавкою із силою 5 Н.

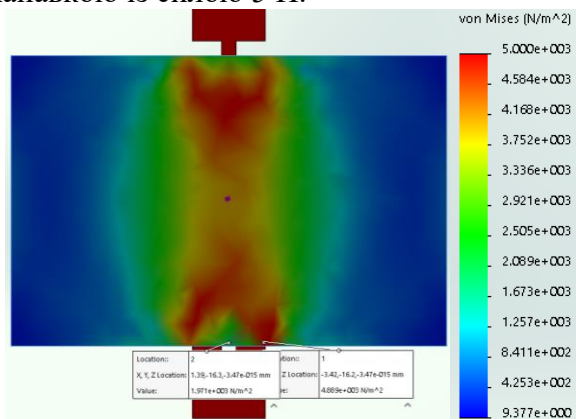


Рис. 7. Епюра розподілу тиску на паренхіму легені

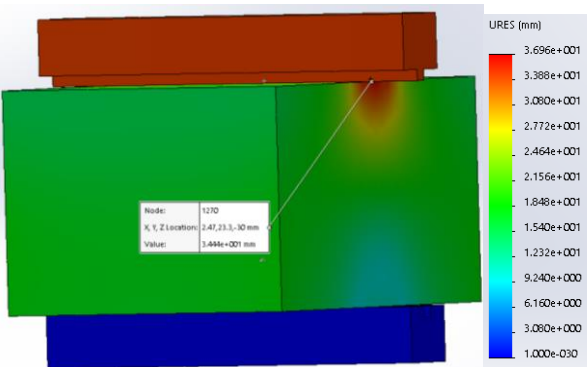


Рис. 8. Епюра переміщення паренхіми легені

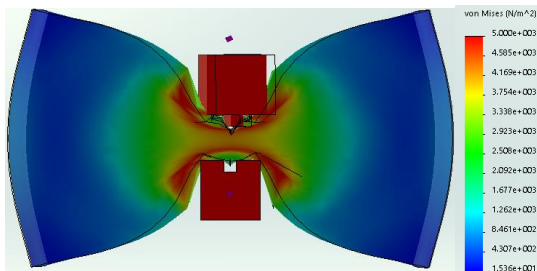


Рис. 9. Епюра входження тканини легені в канавку електрода

На рисунку 9 видно погане входження тканини легені в канавку розмірами 1x1 мм.

На рис. 10-12 приведено результати стиснення паренхіми легені електродами із трикутним виступом зі стороною 1 мм та канавкою із силою 5 Н.

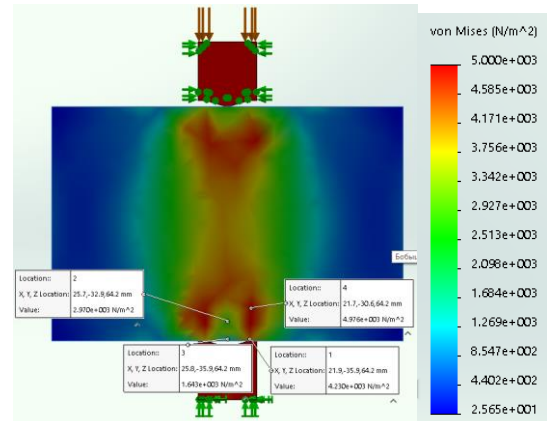


Рис. 10. Епюра розподілу тиску на паренхіму легені

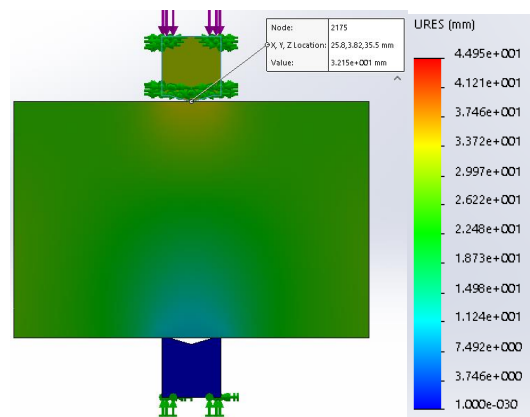


Рис. 11. Епюра переміщення паренхіми легені

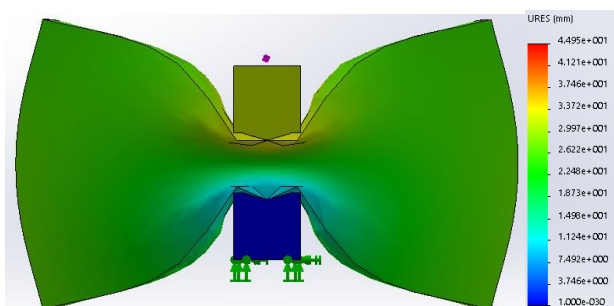


Рис. 12. Епюра входження тканини легені в канавку електрода

Значення результатів, зображених на рис. 2-12 можна звести в таблицю 2:

Таблиця 2 – Результати моделювання стиснення паренхіми

Вид електроду	Максимальний тиск, Н/м ²	Максимальне переміщення, мм	Входження в канавку
Плоский	5026	33,9	-
З прямокутним виступом	7417	36,55	Добре
З квадратним виступом	4976	32,15	Погане
З трикутним виступом	4889	34,44	Добре

Значення максимального стиснення плоским електродом та електродами з квадратним та прямокутним виступами при силі навантаження 5 Н становлять 5026, 4976 та 4889 Н/м² відповідно. Ці значення не перевищують значення модуля пружності паренхіми легені, або знаходяться в межах відхилення на 5%. Не можна допускати, щоб значення тиску в тканині перевищувало її власний модуль пружності, так як в даному випадку відбуватиметься розривання тканини та її фізичне розривання, що, при проведенні операції може призводити до небажаних крововиливів. Значення максимального переміщення в таких електродах також максимально відрізняється на 7%, що можна трактувати як майже однакові. Проте, так як при стисненні паренхіми електродом з квадратним виступом остання майже не входить в канавку, її окреме дослідження можна вважати недоцільним через схожість умов та результатів моделювання із дослідженням плоского електрода.

Максимальний тиск на паренхіму при стисненні електродом з прямокутним виступом зусиллям 5 Н сягає 7417 Н/м², що перевищує модуль пружності паренхіми майже на 50%. Стиснення тканини, відповідно, також є найбільшим серед досліджуваних електродів. Це означає, що при використанні такого електроду можна досягти такого ж тиску та стиснення тканини при докладанні меншого зусилля на власне інструмент, що може бути вкрай важливим при високочастотному зварюванні інших частин легені.

Так як розподіл температур є динамічним, то доцільно буде представити графік залежності максимальних температур від часу проведення процесу зварювання (рис. 13).

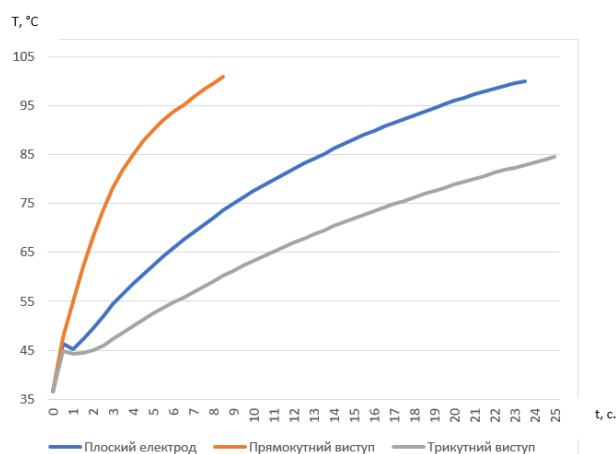


Рис. 13. Графік залежності максимальної температури паренхіми від часу високочастотного зварювання

В результаті проведеної симуляції було отримано криві, які відображають температуру тканини в кожний момент часу процесу зварювання при сталій напрузі 50 В. Найшвидший нагрів відбувається з електродом з прямокутними виступами та канавками. Тут, тканина нагрілась до температур зварювання за 2,5 секунди. З плоским електродом тканина нагрілась до температур зварювання за 7,5 секунд, а з електродом з трикутними виступом і канавкою тканина нагрівалась найдовше, 15 секунд. Температури за 100 °C не були включені в графік, так як при нагріві до таких температур відбувається обвуглення тканини, масове випаровування води, зменшення електропровідності та, як наслідок, сповільнення процесу нагріву.

Швидкий нагрів легеневої тканини під час зварювання зменшує час, потрібний для утворення міцного зварного шва і зменшують час проведення власне операції по високочастотному зварюванню легені.

VII. ВИСНОВКИ

1. Результатом виконання роботи є моделі: плоского електроду, електродів з

прямокутними, трикутними та квадратними виступами та канавками та їх дослідження на статичне навантаження та електричне і теплове дослідження.

2. Досліджено вплив форми електродів на розподіл тиску в тканині, її переміщення та протікання в ній теплових і електричних процесів. Результати досліджень зведені в таблицю 2. Порівняно з плоскими електродами, які на даний момент використовуються для зварювання легень, електроди із прямокутними канавкою та виступом при однаковій прикладеній силі дозволяють отримати майже в 1,5 рази вище значення тиску в тканині, та майже втричі швидший нагрів, при однаковій прикладеній електричній нарузі. Причинами збільшеному тиску в тканині є:

- різка локальна різниця висот між стінками канавки електроду та її основою, які розташовані перпендикулярно один до одного;

- обмеженість простору при поперечній деформації легені внаслідок її стиснення.

3. Також були створені файли моделей та досліджень, на основі яких можна проводити дослідження на будь-яких файлах електродів і біологічних тканин, які підтримуються програмою SOLIDWORKS.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Усі пацієнти, що мають відношення до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

ORCID ID та внесок авторів.

0000-0003-1518-6824 (B,C,E) Popov Stanislav

0000-0002-8692-6677 (A,D,F) Lebedev Alexei

A - Ідея дослідження електродів для високочастотного зварювання, B - Формулювання цілей і завдань дослідження, C - Створення моделей електродів та проведення дослідницького процесу, D - Координація дослідницької діяльності, E - Формування статті, F - Рецензування роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. SolidWorks - світовий стандарт автоматизованого проектування. CommIT. 2017. URL: <http://commit.name/index.php?MainShowID=104&lang=ua> (дата звернення: 01.12.2022).
2. Electromagnetic Simulation for SOLIDWORKS. Computer Aided Technology. 2019. URL: <https://www.cati.com/products/design-analysis/solidworks-simulation/electromagn-etic-simulation/>.
3. Bianchi L., Cavarzan F., Ciampitti L. Thermophysical and mechanical properties of biological tissues as a function of temperature: a systematic literature review. International Journal of Hyperthermia. 2022. No. 39. P. 297–340.
4. Noferest B. S. Inverse-Consistent Determination of Young's Modulus of Human Lung. Florida : University of Central Florida, 2015. 120 p.
5. Density. IT'IS Foundation. 2020. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/density> (date of access: 01.12.2022).
6. Heat Capacity. IT'IS Foundation. 2020. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-capacity> (date of access: 01.12.2022).
7. Heat Transfer Rate. IT'IS Foundation. 2020. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-transfer-rate> (date of access: 01.12.2022).
8. Dielectric Properties. IT'IS Foundation. 2020. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties> (date of access: 01.12.2022).
9. Model for the dielectric properties of human lung tissue against frequency and air content / P. Nopp et al. Medical and biological engineering and computing. 1997. No. 35. P. 695–702.
10. Nopp P., Rapp E., Pftzner H. Dielectric properties of lung tissue as a function of air content. Physics in medicine and biology. 1993. No. 38. P. 699–716.
11. Rossmann C., Haemmerich D. Review of temperature dependence of thermal properties, dielectric properties, and perfusion of biological tissues at hyperthermic and ablation temperatures. Critical Reviews™ in Biomedical Engineering. 2014. No. 42. P. 467–492.

REFERENCES

1. SolidWorks - the light standard for computer-aided design, 2017. [Online]. Available: <http://commit.name/index.php?MainShowID=104&lang=ua>. [Accessed: 01-Dec-2022].
2. "Electromagnetic Simulation for SOLIDWORKS," 2019. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/media/electromagnetic-simulation>. [Accessed: 01-Dec-2022].
3. L. Bianchi, F. Cavarzan, L. Ciampitti, M. Cremonesi, F. Grilli, and P. Saccomandi, "Thermophysical and mechanical properties of biological tissues as a function of temperature: A systematic literature review," International Journal of Hyperthermia, vol. 39, no. 1, pp. 297–340, 2022.
4. B. S. Noferest, Inverse-Consistent Determination of Young's Modulus of Human Lung. Florida: University of Central Florida, 2015.
5. Density, 2020. [Online]. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/density>. [Accessed: 01-Dec-2022].
6. "Heat capacity," Heat Capacity, 2020. [Online]. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-capacity>. [Accessed: 01-Dec-2022].

7. Heat transfer rate (perfusion), 2020. [Online]. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-transfer-rate>. [Accessed: 01-Dec-2022].
8. Dielectric Properties, 2020. [Online]. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties>. [Accessed: 01-Dec-2022].
9. P. Nopp, N. D. Harris, T.-X. Zhao, and B. H. Brown, "Model for the dielectric properties of human lung tissue against frequency and Air Content," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 35, no. 6, pp. 695–702, 1997.
10. P. Nopp, E. Rapp, H. Pftzner, H. Nakesch, and C. Rusham, "Dielectric properties of lung tissue as a function of Air Content," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 38, no. 6, pp. 699–716, 1993.
11. C. Rossmanna and D. Haemmerich, "Review of temperature dependence of thermal properties, dielectric properties, and perfusion of biological tissues at hyperthermic and ablation temperatures," *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 467–492, 2014.

UDC 617-7 + 616-72

ELECTRODES FOR LUNG WELDING INSTRUMENT

Stanislav Popov

astrojoshi@gmail.com

Alexei Lebedev

biowelding@gmail.com

Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract – Background. The young's modulus and elasticity of the lungs are lower, compared to other tissues to which the high-frequency welding method is applied. The impedance is also higher, which forces to apply additional loads to the lung and increase voltage to achieve successful high-frequency lung welding.

Objective. Substantiation of the shape and characteristics of electrodes based on the results of studies of thermal, mechanical and electrolytic effects on lung tissue when modeling the welding process.

Methods. To achieve this goal, we used the computer-aided design environment SOLIDWORKS with its add-on packages: SOLIDWORKS Simulation, for simulating the flow of mechanical processes, and EMS SOLIDWORKS, for simulating the flow of thermal and electromagnetic processes while high-frequency lung welding. The simulation used 3D computer models-analogs of the lung parenchyma and electrodes of various shapes.

Results. The processes of high-frequency electric welding of the lung parenchyma model was simulated and the results of mechanical, thermal and electrical processes in the parenchymal tissue are obtained. Thus, the values of pressure on the tissue, its compression and heating time to high-frequency welding temperatures for: flat electrodes are 5026 N/m², 33.9 mm and 7.5 seconds; electrodes with rectangular protrusion and groove are 7417 N/m², 36.55 mm and 2.5 seconds; electrodes with triangular groove and protrusion are 4889 N/m², 34.44 mm and 15 seconds; electrodes with a square protrusion and groove are equal to 4976 N/m² and 32.15 mm. Parenchymal tissue fits well into the rectangular and triangular grooves of electrodes, but poorly into the square groove of electrode, so the one was excluded from the analysis in the EMS package.

Conclusions. As a result of this work, models of electrodes of various shapes for the lung welding tool, the value of the specific pressure on the fabric, the values for contraction of the tissue and the distribution of the temperature of the tissue over time were obtained. Based on these data, the best shape of the electrodes was determined – with rectangular grooves. Model and research files have also been created, which can be used to conduct research on any electrode and biological tissue files that are supported by the SOLIDWORKS ecosystem.

Keywords – Computer simulation, dissection, electric conductivity, electrodes, lung, pressure, temperature.