

УДК 519.876.5:616.329-006.04-089.844-033.3:611.33

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТРАТОРАКАЛЬНОГО ШЛУНКА, ВИКОРИСТАНОГО ДЛЯ ЕЗОФАГОГАСТРОПЛАСТИКИ: БАЗОВІ ЗАСАДИ, МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Винниченко О. І.*

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

(отримано 19.09.2013, опубліковано 15.10.2013)

Існуючі дані не дозволяють вірогідно пояснити, як відбувається спорожнення від їжі інтраторакального шлунка, використаного для пластики резектованого стравоходу. Вимушена двобічна ваготомія та часткова симпатектомія призводять до того, що шлунковий трансплантат діє як інертна трубка, і введена в нього їжа рухається лише за рахунок сили тяжіння. Завдяки цьому створена фізико-математична модель інтраторакального шлунка, яка має на меті визначення терміну транзиту через нього вмісту різної консистенції. Ця модель визначає вплив величини шлункового трансплантату та виконання пілородренувальних операцій на ефективність його спорожнення. В базовій моделі шлунка діаметром 60 мм простежено транзит води та гліцерину через модель пілоричного каналу шириною 3,5 мм, 7 мм та 14 мм. Встановлено, що термін спорожнення моделі для води є найменшим при проходженні тестової рідини через пілоричний канал шириною 14 мм. Ця різниця є статистично достовірною порівняно із шириною каналу 7 мм та 3,5 мм. Термін спорожнення для гліцерину є статистично вірогідно більшим порівняно з терміном спорожнення моделі від води незалежно від ширини пілоруса. Отримані дані підтверджують висновок про доцільність пілородренувальних операцій при езофагогастропластиці.

Ключові слова: езофагогастропластика, шлунковий трансплантат, час спорожнення, моделювання інтраторакального шлунка.

* vynychn@gmail.com

«Ніякі людські дослідження не можна назвати справжньою наукою, якщо вони не пройшли через математичне доведення»

Леонардо да Вінчі

Вступ

Для пластики резектованого стравоходу з приводу його злоякісного ураження переважно використовують шлунок. Його переваги над іншими варіантами езофагопластики широковідомі [1; 2].

Підготовка шлунка як стравоходного трансплантата з розташуванням у грудній порожнині приводить до значних змін форми, кровозабезпечення, основних функцій [3].

Найбільш суттєвими є такі зміни:

1. Орган переміщається в нетипове для нього місце функціонування (у грудну порожнину, де існує негативний тиск).

2. Видаляється антирефлюксний бар'єр між шлунком та стравоходом.

Змінюється форма шлунка (він набирає вигляду витягнутої трубки).

3. Значно знижуються об'єм шлунка і кількість парієтальних клітин (унаслідок часткової резекції дна та тіла органа).

4. Кровопостачання шлунка зменшується на 40–50 % (у зв'язку з перев'язкою лівої шлункової, лівої шлунково-сальникової і коротких артерій органа).

5. Змінюється іннервація у результаті двобічної стовбурової ваготомії і часткової симпатектомії шлункового трансплантата, порушується його моторика, виникають функціональні розлади у вигляді пілороспазму та відповідно гастростазу, які впливають на якість життя хворих.

Таким чином, хірургічне втручання вимушено впливає на секрецію, моторику шлунка, формує умови для виникнення патологічного гастроєзофагеального і дуоденогастрального рефлюксу [3; 4].

Шлунковий трансплантат унаслідок втрати парасимпатичної (проводиться двобічна стовбурова ваготомія) та симпатичної

(пересікаються черевні нерви під час перев'язування лівої шлункової артерії на рівні черевного стовбура) іннервації виконує функцію пасивної трубки, в якій їжа пересувається лише за рахунок сили тяжіння [5].

Доступні дані літератури не дають можливості пояснити процес спорожнення інтраторакального шлунка від їжі. Якщо зважити на такі чинники, як:

а) нетривале життя пацієнтів унаслідок агресивного перебігу хвороби [1; 10; 11];

б) небажання пацієнтів та лікарів брати участь у непростих функціональних дослідженнях оперованих органів, у тому числі через додаткове променеве навантаження на пацієнта;

в) технічні труднощі обстеження стравоходу та інтраторакального шлунка, розташованих у задньому середостінні [6; 7];

г) кількість (принаймні 3) варіантів формування шлунка як трансплантата (цілий орган, широка трубка, вузька трубка) та різних підходів до пілордренувальних операцій (повне заперечення необхідності виконання, пілороміотомія, пальцьове роздавлювання пілоруса) призводить до неоднорідності експериментальних груп та неможливості зіставлення даних про евакуацію [8; 9], то знаходимо пояснення, чому до цього часу за результатами досліджень функціональних проявів шлункового трансплантата не отримано вірогідної відповіді на запитання: моторно-евакуаторна функція інтраторакального шлунка схожа швидше на прояви природного шлунка чи стравоходу? Чи, можливо, йому властиві нові, не характерні для природних попередників, характеристики?

Усе це спонукало нас використати метод моделювання спорожнення. Це і дає можливість запобігти вищезазначеним обмеженням, і встановити взаємозв'язок між чинниками, відповідальними за евакуацію із інтраторакального шлунка. Такий підхід значно полегшує аналіз явища порівняно з його спостереженнями у природних умовах [12; 13] або, іншими словами, дозволяє провести експеримент у контрольованих умовах.

Методом вивчення, який за допомогою формул та рівнянь описує властивості досліджуваного об'єкта, є математичне моделювання. Метод математичного моделювання дозволяє: виключити необхідність виготовлення громіздких фізичних моделей,

пов'язаних із матеріальними витратами; скорочувати час визначення характеристик, вивчати особливості об'єкта моделювання при різних значеннях параметрів, прогнозувати характер їх змін; аналізувати можливість застосування різних елементів, отримувати характеристики і показники, які складно отримати експериментально [12].

Згідно із рекомендаціями щодо складання математичних моделей [13] була сформульована мета моделювання. Вона передбачає визначення терміну спорожнення від вмісту інтраторакального шлунка. Ця модель дасть можливість виявити залежність евакуаторної функції від величини шлункового трансплантата та виду пілордренувальної операції.

Матеріали і методи

Для створення моделі були використані зображення комп'ютерної томографії у 6 пацієнтів через 3 місяці після операції Льюїса (зрізи від рівня верхньої апертури грудної клітки до рівня пілоричного каналу) [14]. Отримано по 90 зрізів для кожного пацієнта. Для спрощення поперечні зрізи шлунка були взяті як циркулярна трубка. Середня довжина трансплантата становила 250 мм, ширина – 55-75 мм.

Таблиця 1

Термін проходження тестових рідин залежно від діаметра пілоричного каналу в моделі інтраторакального шлунка (діаметр моделі шлунка 60 мм)

Тестова рідина	Ширина пілоруса 3,5 мм	Ширина пілоруса 7 мм	Ширина пілоруса 14 мм	P-тест
	1	2	3	4
Вода	38,8 ± 1,1	9,85 ± 0,8	2,46 ± 0,8	P ₁₋₃ < 0,05 P ₁₋₂ < 0,05
Гліцерин	142,6 ± 1,6	26,4 ± 1,0	12,3 ± 1,5	P ₁₋₃ < 0,05 P ₁₋₂ < 0,05
	P _{вода-гліцерин} < 0,05	P _{вода-гліцерин} < 0,05	P _{вода-гліцерин} < 0,05	

Дані, подані в табл. 1., показують час у секундах, за який тестова рідина пройшла через пілоричний канал, тобто відбулося спорожнення моделі шлунка від вмісту. Дані надані у вигляді середньої величини ± стандартне відхилення.

Стандартне відхилення t-тест обчислювався з метою встановлення статистичної різниці між часом проходження тестової рідини через різні діаметри пілоричного каналу (стовпчик 4) та між групами із різними тестовими рідинами (горизонтальний рядок).

З метою перевірки достовірності наших математичних висновків була створена фізична (тривимірна) модель шлункового трансплантата, виготовлена з еластичного синтетичного

матеріалу товщиною 0,4-0,5 мм у формі циліндра діаметром 60 мм (відповідає ширині шлункового трансплантата при операції Льюїса), розміщеного у герметичній порожнині із прозорого пластика.

Для вивчення пасажу рідини через пілоричний канал, виготовлена його модель із прозорого акрилу з насадками діаметром 3,5 мм, 7 мм та 14 мм. Моделі торакального шлунка та пілоричного каналу з'єднані між собою. До моделі пілоричного каналу приєднана гумова трубка з метою регуляції тиску супротиву спорожненню, який існує природно в черевній порожнині. Схема моделі та фото додаються (рис.1, 2).

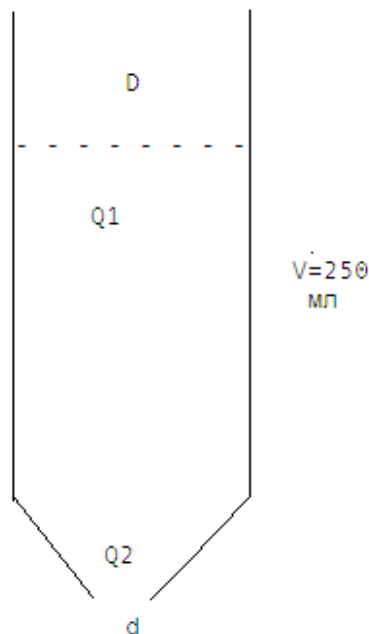


Рис.1. Схема моделі інтраторакального шлунка:

Q1- потік рідини через інтраторакальний шлунок;
Q2- потік рідини через пілоричний канал, $Q1=Q2$;
D – діаметр інтраторакального шлунка;
d- діаметр пілоричного каналу;
V – об'єм введеної рідини.

У базовому варіанті моделі не буде враховуватися негативний інтраплевральний тиск та тиск у черевній порожнині. Після тестування моделі обидва параметри будуть взяті до уваги.

Як тестові рідини взяті вода та гліцерин. В'язкість цих рідин при температурі 20 градусів Цельсія становить 1,00 та 1490 мПа*с, а питома вага відрізняється в 1,27 раза. Гліцерин вибраний як тестова рідина у зв'язку із тим, що за в'язкістю, консистенцією він близький до

рідкої каші (рисової, манної), яку пацієнтам призначають у післяопераційному періоді.



Рис.2. Фото моделі інтраторакального шлунка та пілоричного каналу

Потік рідини реєстрували за допомогою швидкісної відеокамери (частота 30 зображень за секунду), яка була розміщена на рівні проходження рідини через пілоричний канал. З метою покращання візуалізації рідину зафарбовували чорнилом.

Результати та їх обговорення

Теоретично шлунковий трансплантат можна уявити у вигляді вертикального циліндра (трубки) з вихідним каналом у нижній частині, ширина якого може варіювати, а площа його є перпендикулярною до напрямку трубки. Ключовими факторами, які зумовлюють спорожнення трубки (модель інтраторакального шлунка) від рідини, є її гравітація та в'язкість. Гравітаційні сили прискорюють спорожнення трубки від рідини. Навпаки, цьому перешкоджає в'язкість рідини та її тертя об стінку [15].

Якщо знехтувати в'язкістю рідини (припустити, що це вода із в'язкістю 1,0), то потік рідини описується формулою Бернуллі

$$PV + mgh + \frac{mv^2}{2} = const \quad (1)$$

Після спрощення формули (1) з урахуванням того, що

$$m = V\rho,$$

отримуємо

$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = const, \quad (2)$$

де P – статичний тиск;

ρgh – гідростатичний тиск;

$\frac{\rho v^2}{2}$ – динамічний тиск.

Сума всіх тисків є постійною на всіх ділянках потоку рідини.

З урахуванням формули витрати потоку рідини:

$$Q = \frac{V}{t} (M^3/c),$$

$$t = \frac{V}{Q},$$

$$\text{де } Q = v \cdot \omega = v \times \frac{\pi D^2}{4}$$

та нерозривності потоку $Q_1 = Q_2$,

отримуємо формулу часу спорожнення моделі від рідини:

$$t = \sqrt{\frac{8V \times \left[\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1\right]}{\pi g D^2}}, \quad (3)$$

де t – час спорожнення;

V – об'єм води у літрах, що витікає;

D – діаметр трубки торакального шлунка, м;

d – діаметр моделі пілоричного каналу, м;

$\pi = 3,14$;

$g = 9,8$, м/с², прискорення гравітації.

Для перевірки відповідності даних, отриманих за допомогою фізичної моделі та формули (3), проведемо, як приклад, розрахунок (моделі шлунка = 60 мм, d пілоричного каналу = 7 мм, тестова рідина – вода):

$$t = \sqrt{\frac{8V \times \left[\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1\right]}{\pi g D^2}} =$$

$$\sqrt{\frac{8 \times 0,00025 \times \left[\left(\frac{0,06}{0,007}\right)^4 - 1\right]}{3,14 \times 9,81 \times 0,06^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,002 \times [(8,57)^4 - 1]}{30,772 \times 0,0036}} =$$

$$= \sqrt{0,018 \times [5394 - 1]} = \sqrt{97,1} = 9,85 \text{ с,}$$

що відповідає терміну спорожнення, зафіксованого для фізичної моделі.

Перевірка відповідності формули за одиницями вимірювання:

$$t = \sqrt{\frac{8V \times \left[\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1\right]}{\pi g D^2}} = \sqrt{\frac{M^3 \times \left[\left(\frac{M}{M}\right)^4 - 1\right]}{\frac{M}{c^2} \times M^2}} =$$

$$= \sqrt{c^2} = c \text{ (секунда).}$$

Емпіричні дані, отримані за допомогою фізичної моделі інтраторакального шлунка (діаметр 60 мм), відповідають результатам обчислення за математичною формулою (3), виведеною із рівняння Бернуллі. Необхідно зазначити, що у формулі не врахована в'язкість тестової рідини.

Висновки

1. Базова модель інтраторакального шлунка встановлює певні закономірності спорожнення моделі від тестової рідини. Ці закономірності описуються універсальним рівнянням для потоку рідини Бернуллі.
2. Розрахунок часу спорожнення моделі інтраторакального шлунка (D) через пілоричний канал (d) від води (в'язкість 1,0) дозволив отримати математичне рівняння (3). Воно свідчить, що термін спорожнення залежить від діаметра шлункової трубки та пілоричного каналу.
3. Рівняння (3) дозволяє зробити висновки: а) термін її спорожнення збільшується при зменшенні діаметра пілоричного каналу та збільшенні діаметра шлункової трубки; б) на термін спорожнення трубки більше впливає показник D (діаметр шлункової трубки), ніж d (діаметр пілоричного каналу).
4. Рівняння (3) не дозволяє розрахувати час спорожнення від рідини, відмінної за в'язкістю від води.

Окрім того, можливі висновки щодо розвитку моделі:

- 1) необхідно вивчити час спорожнення моделі, яка має ширину, що відрізняється від базової: 30 мм – модель вузької трубки, використаної для інтраторакального шлунка, та 90 мм, яка буде моделювати цілий шлунок, розміщений інтраторакально;
- 2) необхідно ввести параметри впливу на спорожнення моделі шлунка: 1) негативний інтраплевральний тиск; 2) позитивний тиск

внутрішньоабдомінальний; 3) зміна напрямку руху тестової рідини із вертикального до руху під кутом, що моделює природне розташування шлунка на рівні перетину діафрагми.

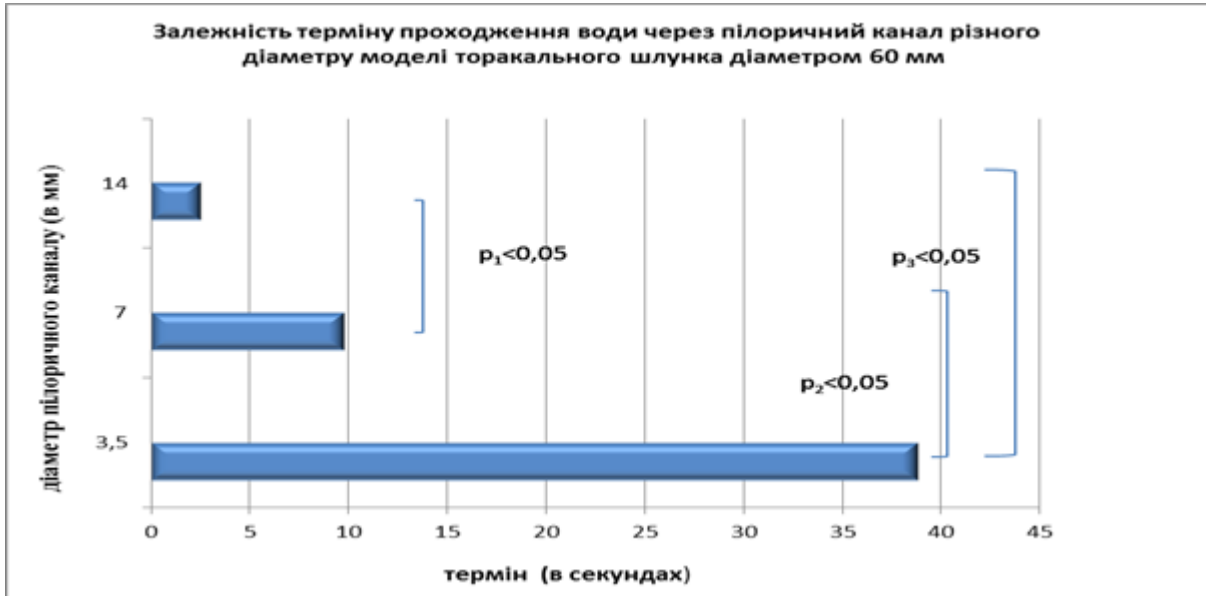


Рис. 3. Залежність терміну проходження води через пілоричний канал різного діаметра

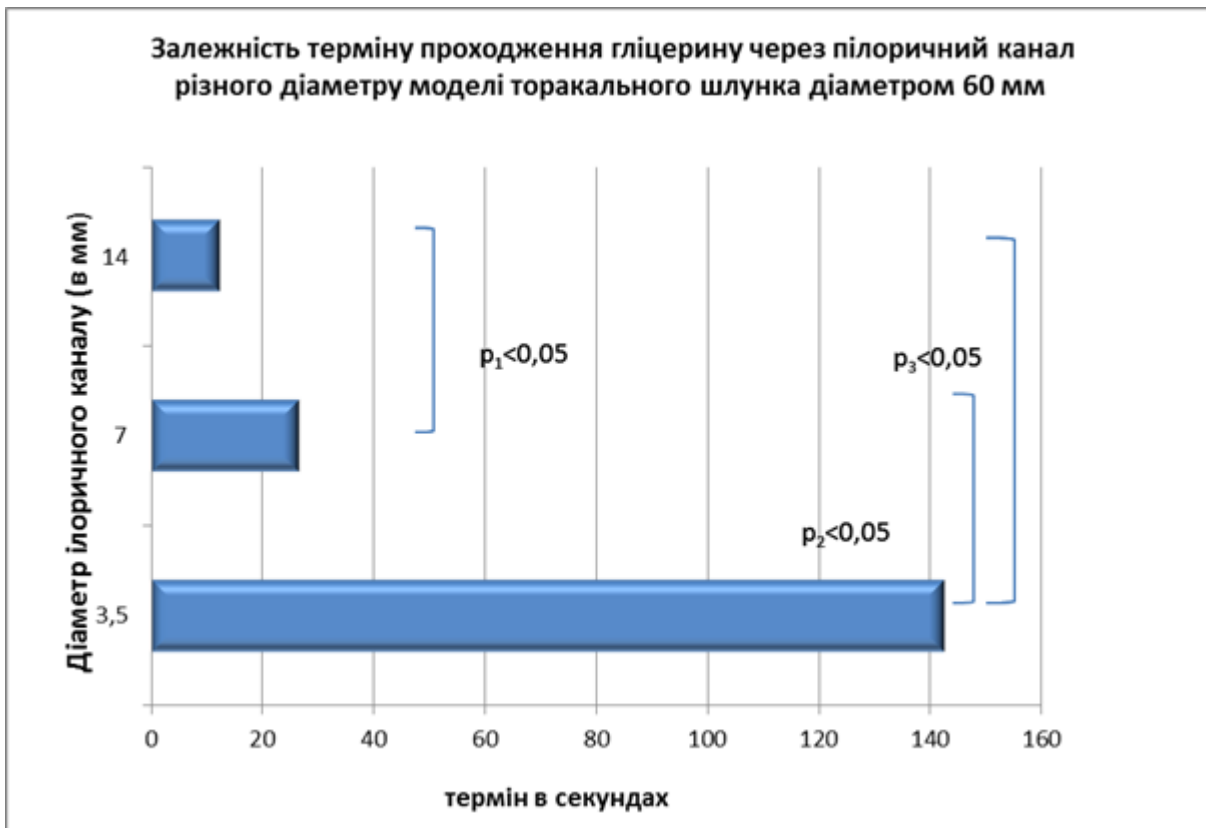


Рис.4. Залежність терміну проходження гліцерину через пілоричний канал різного діаметра

Список літератури

1. Ганул В. Л. Рак пищевода: Руководство для онкологов и хирургов / В. Л. Ганул, С. И. Киркилевский. – Киев: Книга Плюс, 2003. – 200 с.
2. Давыдов М. И. Рак пищевода / М. И. Давыдов, И. С. Стилиди. – Москва: Практическая медицина, 2007. – 392 с.
3. The esophageal remnant after gastric interposition / X. B. D'Journo, J. Martin, P. Ferraro, F. A. Duranceau // Dis. Esophagus. – 2008. – Vol. 21. – P. 377–388.
4. Donington J. S. Functional conduit disorders after esophagectomy/ J. S. Donington // Thorac. Surg. Clin. – 2006. – Vol. 16, № 1. – P.53–62.
5. Gastric motor activity in gastric pull-up esophagectomized patients with and without reflux symptoms/ T. Nakabayashi, E. Mochiki, Y. Kamiyama, H. Kuwano // Ann. Thorac. Surg. – 2012. – Vol.94. – P.1114–1117.
6. Рентгенодиагностика внутриплевральных осложнений после хирургического лечения по поводу рака пищевода и кардии / В. Т. Малькевич, Е. В. Богушевич, Л. И. Оситрова // Новости хирургии. – 2011. – Т. 19, № 6. – С. 95–100.
7. Transposed intrathoracic stomach: Functional evaluation / V. Jain, S. Sharma, R. Kumar [et al.] // Afr. J. Paediatr. Surg. – 2012. – Vol. 9. – P. 210–216.
8. Отдаленные функциональные результаты различных видов желудочной эзофагопластики/ Д. Г. Мустафин, Р. Д. Мустафин, Е. В. Булгаков, А. С. Иванов // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2007. – № 2. – С. 39–43.
9. Propensity-matched analysis of three techniques for intrathoracic esophagogastric anastomosis / S. H. Blackmon, A. M. Corre, B. Wynn [et al.] // Ann. Thorac. Surg. – 2007. – Vol. 83. – P.1805–1813.
10. Операция Льюиса при раке грудного отдела пищевода, ближайшие и отдаленные результаты/ А. И. Воробьев, Р. Д. Мустафин, П. Н. Злыгостев, Е. В. Булгаков // Грудная хирургия. – 2005. – № 2. – С. 44–47.
11. Стариков В. И. Хирургические аспекты комбинированного лечения рака проксимального отдела желудка / В. И. Стариков // Международный медицинский журнал. – 2009. – № 1. – С.92–96.
12. Петров И. Б. Математическое моделирование в медицине и биологии на основе моделей механики сплошных сред / И. Б. Петров // Труды МФТИ. – 2009. – Том 1, № 1. – С. 5–16.
13. Olar O. I. Medical and biological physics /O. I. Olar, V. I. Fediv // Biomechanical and Electrical Principles in Medicine. – 2011. – Vol. 2. – 266 p.
14. Самойлов П. В. Изменения топографии органов средостения после резекции пищевода с пластикой желудочным трансплантатом (операция типа Льюиса) в отдаленные сроки после операции/ П. В. Самойлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 5–1. – С. 135–138.
15. Prithard P. J. Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics / P. J. Prithard / Hoboken.: John Wiley and Sons, Inc., 2011. – 899 p.

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТРАТОРАКАЛЬНОГО ЖЕЛУДКА,
ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ЭЗОФАГОГАСТРОПЛАСТИКИ: БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ, МЕТОД
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Винниченко А. И.

*Сумский государственный университет
ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007*

Существующие данные не позволяют достоверно объяснить, как происходит транспортировка пищи через интраторакальный желудок, используемого для пластики резецированного пищевода. Вынужденная двухсторонняя ваготомия и частичная симпатэктомия приводят к тому, что желудочный трансплантат действует как инертная трубка, и попавшая в него еда движется только за счет силы

тяготения. Основываясь на это, была создана физико-математическая модель интраторакального желудка, цель которой определение термина транзита пищи разной концентрации. Эта модель определяет влияние размера желудочного трансплантата и применение пилородренирующих операций на эффективность опорожнения желудка. В базовой модели желудка диаметром 60 мм проследили транзит воды и глицерина через модель пилорического канала (ширина 3,5 мм, 7 мм и 14 мм). Установлено, что термин траспортировки воды является наиболее коротким при прохождении тестовой жидкости по пилорическому каналу шириной 14 мм. Эта разница статистически достоверная по сравнению с шириной канала 7 мм и 3,5 мм. Термин транспортировки глицерина статистически достоверно больший по сравнению с термином транспортировки воды, независимо от ширины пилориса. Полученные данные подтверждают вывод о целесообразности пилородренирующих операций при эзофагогастропластике.

Ключевые слова: эзофагогастропластика, желудочный трансплантат, время транспортировки, моделирование интраторакального желудка.

**THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF INTRATHORACIC STOMACH
USED FOR ESOPHAGOGASTROPLASTY: BASIC PRINCIPLES AND METHOD OF
MATHEMATIC MODELING**

Vynnychenko O. I.

Sumy State University

2 Rymського-Korsakova St., Sumy, Ukraine, 40007

There are limited data that can explain how food transports through the intrathoracis stomach that is used for esophageal resection. Bilateral vagotomy and partial sympathectomy make the stomach transplant act as an inert tube; although, food moves there only by the gravitation force. Regarding to this, I have made the physical and mathematical model of intrathoracic stomach to determine required terms for transportation of food of various consistency. The model distinguishes roles of the size of stomach implant and performance of the pylor-draining operations; and their effects on the efficiency of food transportation. Using the basic model of stomach (with a diameter 60 mm), I observed water and glycerin transportation though the pyloric canal *model/simulator* with width of 3.5 mm, 7 mm and 14 mm. I have pointed out that the term of water transportation though the pyloric canal (with width 14 mm) was the shortest. This fact is statistically reliable comparing with the canal width of 7 mm and 3.5 mm. The term of glycerin transportation is significantly higher comparing to water transportation though the model; even despite the width of pyloric canal. The research results confirmed necessity of pylor-draining operations for esophagogastroplasty.

Key words: esophagogastroplasty, stomach transplant, transportation term, the modeling of intrathoracic stomach.