

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПЕННОГО БАРБОТАЖНО-ФЛОТАЦИОННОГО ДЕБРИДМЕНТА В ЛЕЧЕНИИ ГНОЙНЫХ РАН МЯГКИХ ТКАНЕЙ

EFFECTIVENESS OF FOAM BUBBLE-FLOTATION DEBRIDMENT TECHNOLOGY IN THE TREATMENT OF PURULENT WOUNDS OF SOFT TISSUE

Остроушко А.П. Глухов А.А. Андреев А.А. Лаптиёва А.Ю. Земсков А.М. Подвигина В.С.
Ostroushko A.P. Glukhov A.A. Andreev A.A. Laptiyova A.Yu. Zemskov A.M. Podvigina V.S.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Минздрава России,

ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Воронеж»,

г. Воронеж, Россия

Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko,

Clinical Hospital "RZhD-Medicine",

Voronezh, Russia

Частота развития раневой инфекции в общей хирургии варьирует от 10 до 35 % среди всех пациентов хирургического стационара. При экстренной патологии доля нагноений послеоперационных ран достигает 25–30 %, что в 2–3 раза выше, чем при плановых вмешательствах. Инфицирование ран существенно влияет на показатели заболеваемости и смертности. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования механизмов раневого процесса, разработка эффективных методов воздействия на него, оптимизация системной патогенетической терапии и создание персонализированных подходов к лечению.

Цель исследования — разработать технологию пенного барботажно-флотационного дебридмента (ПБФД) и устройство для ее осуществления, а также изучить эффективность данного метода в местном лечении экспериментальных гнойных ран мягких тканей.

Материалы и методы. Исследование выполнено на базе Научно-исследовательского института экспериментальной биологии и медицины ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России на 72 половозрелых самцах крыс линии Wistar с моделированными гнойными ранами в области бедра. Объем лечения зависел от группы исследования: в 1-й контрольной группе выполняли ежедневные перевязки с изотоническим раствором натрия хлорида, во 2-й — перевязки дополняли сеансами барботажной санации (БС) в изотоническом растворе натрия хлорида; в опытной — сеансами ПБФД. Животных выводили из эксперимента на 1, 3, 7 и 10-е сутки от начала лечения. Для оценки течения раневого процесса и динамики заживления применяли планиметрические, лабораторные и статистические методы исследования.

Результаты. Технология ПБФД гнойных ран обеспечила оптимальные условия для заживления за счет нормализации pH ран, что привело к ускорению сроков купирования отека на 24,33 % и гиперемии на 24,52 %, в сравнении с использованием БС. Применение разработанного подхода позволило значимо снизить показатели воспаления и бактериальной об-

The incidence of wound infection in general surgery ranges from 10 % to 35 % of all surgical inpatients. In emergency cases, the incidence of postoperative wound suppuration reaches 25–30 %, which is 2–3 times higher than in elective procedures. Wound infection significantly impacts morbidity and mortality. Therefore, further research into the mechanisms of wound healing, the development of effective interventions, the optimization of systemic pathogenetic therapy, and the creation of personalized treatment approaches are needed.

Objective — to develop the foam bubble-flotation debridement (FBFD) technology and a device for its implementation, as well as to study the effectiveness of this method in the local treatment of experimental purulent wounds of soft tissues.

Materials and methods. The study was conducted at the Research Institute of Experimental Biology and Medicine of the N.N. Burdenko Voronezh State Medical University on 72 sexually mature male Wistar rats with simulated purulent wounds in the thigh area. The volume of treatment depended on the study group: in the 1st control group, only daily dressings with an isotonic solution of sodium chloride were performed; in the 2nd control group, dressings were supplemented with bubbling sanitation sessions in an isotonic solution of sodium chloride; and in the experimental group, with bubbling-flotation debridement sessions. The animals were removed from the experiment on days 1, 3, 7, and 10 from the start of treatment for the purulent wound. Objective, planimetric, laboratory, and statistical research methods were used to assess the course of the wound process and the dynamics of wound healing.

Results. The use of FBFD technology for purulent wounds allowed for optimal conditions for healing due to the change in the pH of the wounds, which led to 24.33 % reduction in the time required to reduce swelling and 24.52 % reduction in the time required to reduce hyperemia, compared to the use of bubbling sanitation. The use of the

Для цитирования: Остроушко А.П., Глухов А.А., Андреев А.А., Лаптиёва А.Ю., Земсков А.М., Подвигина В.С. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПЕННОГО БАРБОТАЖНО-ФЛОТАЦИОННОГО ДЕБРИДМЕНТА В ЛЕЧЕНИИ ГНОЙНЫХ РАН МЯГКИХ ТКАНЕЙ //ПОЛИТРАВМА / POLYTRAUMA. 2026. № 2. С. 106-115.

Режим доступа: <http://poly-trauma.ru/index.php/pt/article/view/657>

DOI: 10.24412/1819-1495-2026-2-106-115

семенности ран, что способствовало равномерному развитию полноценной грануляционной ткани, закрытию раневого дефекта до 93,72 % на 10-е сутки от начала лечения.

Заключение. Процесс заживления ран представляет собой комплексное взаимодействие временных, микробиологических, иммунологических и физико-химических факторов, тесно взаимосвязанных между собой. Наиболее сильные корреляции обнаружены между сроком наблюдения и pH раны, сроком наблюдения и ее площадью, а также между бактериальной обсемененностью и размером раневого дефекта, что подчеркивает ключевую роль этих факторов в регенерации.

Ключевые слова: раны; дебридмент; барботажная санация; гнойные раны; раневая инфекция

developed technology significantly reduced inflammation and bacterial contamination in the wounds, which contributed to the uniform development of healthy granulation tissue and the closure of the wound defect to 93.72 % on the 10th day of treatment.

Conclusion. The wound healing process is a complex interaction of temporal, microbiological, immunological, and physico-chemical factors, all of which are closely interrelated. The strongest relationships were found between the duration of observation and the pH of the wound, the duration of observation and the area of the wound, as well as between bacterial contamination and the area of the wound, which emphasizes the key role of these factors in the regeneration process.

Keywords: wounds; debridement; bubbling sanitation; purulent wounds; wound infection

Проблема лечения гнойных ран мягких тканей остается одной из самых значимых в современной хирургии. Несмотря на тысячелетнюю историю изучения этого вопроса, его окончательного решения не найдено до сих пор [1–3]. Более того, в XXI веке задачи гнойной хирургии приобрели еще более острый характер. Это связано с комплексом факторов: глобальным ростом антибиотикорезистентности, изменением структуры возбудителей, старением населения и увеличением числа пациентов с тяжелой сопутствующей патологией (сахарным диабетом, ожирением, иммунодефицитными состояниями и др.), значительно отягощающей течение раневого процесса [2, 3, 4]. К примеру, сахарный диабет — один из главных факторов риска тяжелого течения инфекционных осложнений. Синдром диабетической стопы, развивающийся у 15–25 % пациентов с диабетом, в 50–70 % случаев осложняется гнойно-некротическим процессом, который нередко приводит к высокой ампутации конечности [5, 6].

Частота развития раневой инфекции в общей хирургии варьирует от 10 до 35 % среди всех пациентов хирургического стационара [7, 8]. При наличии патологии, требующей экстренного вмешательства, частота нагноений операционных ран достигает 25–30 %, что в 2–3 раза выше, чем при плановых вмешательствах [7, 9]. Инфицирование послеоперационных ран существенно влияет на показатели заболеваемости и смертности: по последним данным, оно является причиной более 2 млн внутрибольничных инфекций в США [10]. Следует отметить, что нагноение тканей в области вмешательства не только удлинит сроки госпитализации в среднем на 10–14 дней, но и может нивелировать результат самой операции, приводя к формированию

грубых рубцов, лигатурных свищей, послеоперационных грыж и длительной нетрудоспособности пациента [11].

По данным зарубежных исследований, стоимость лечения одного пациента с инфицированной раной может превышать стоимость первичной операции в 3–5 раз. В масштабах страны прямые и косвенные затраты, связанные с лечением раневой инфекции, исчисляются миллиардами долларов ежегодно [12, 13].

На сегодняшний день гнойные раны мягких тканей рассматриваются не просто как локальный дефект, а как системный патологический процесс, вовлекающий весь организм. Они служат входными воротами для инфекции, приводя к сепсису, септическому шоку и полиорганной недостаточности, которые остаются основными причинами летальности в хирургических стационарах [9].

Таким образом, проблема лечения гнойных ран мягких тканей сохраняет свою исключительную актуальность в современной хирургии. Высокая частота встречаемости, рост антибиотикорезистентности, тяжесть течения на фоне коморбидной патологии, значительные экономические потери и социальные последствия делают данный вопрос междисциплинарным, требующим объединения усилий хирургов, микробиологов, фармакологов и реабилитологов.

Несмотря на появление новых антибактериальных препаратов, совершенствование хирургической техники и разработку инновационных раневых покрытий, количество нерешенных вопросов не уменьшается. Это диктует необходимость дальнейших научных исследований, направленных на изучение механизмов раневого процесса, разработку эффективных методов

воздействия на него, оптимизацию системной патогенетической терапии и создание персонализированных подходов к лечению пациентов с учетом индивидуальных особенностей и факторов риска.

Цель исследования — разработать технологию пенного барботажно-флотационного дебридмента (ПБФД) и устройство для ее осуществления, а также изучить эффективность ее применения в местном лечении экспериментальных гнойных ран мягких тканей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на базе Научно-исследовательского института экспериментальной биологии и медицины ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России на 72 половозрелых самцах крыс линии Wistar массой 280–320 г.

Всем животным моделировали гнойные раны в области бедра. Предварительно участок кожи на наружной поверхности бедра выбривали. После общего обезболивания препаратом «Золетил-100» в дозировке 8 мг/кг производили двукратную обработку подготовленного участка кожи 0,05% водным раствором хлоргексидина биглюконата и ограничивали операционное поле. С целью создания идентичной модели раневого процесса во всех группах исследования рану наносили скальпелем по пластиковому шаблону диаметром 1,5 см. Выполняли иссечение кожи, подкожной клетчатки и поверхностной фасции. Смоделированную «чистую» рану промывали 0,9% раствором хлорида натрия.

Для моделирования инфекционного процесса на подготовленную раневую поверхность наносили суточную взвесь культуры *Staphylococcus aureus* в объеме 1 мл (концентрация 10^9 ми-

кробных тел в 1 мл), после чего рану ушивали. Концентрацию микробных тел определяли предварительно по стандарту мутности. Признаки нагноения регистрировали на 2-е сутки: отмечали появление отека, гиперемии в области дефекта и гнойного экссудата. На 3-и сутки визуализировали сформированную модель острого гнойного воспаления мягких тканей с обильным отделяемым. Затем снимали швы, что сопровождалось выделением 2–3 мл мутного экссудата. После этого на поверхность раны накладывали асептическую повязку.

Лечение гнойных ран начинали через 72 ч от начала эксперимента (срок, необходимый для формирования гнойного очага). Этот момент служил отправной точкой для отсчета периода наблюдения за результатами терапии.

Объем лечебных мероприятий зависел от группы исследования: в 1-й контрольной группе (n = 24) выполняли только ежедневные перевязки с изотоническим раствором натрия хлорида без специфического лечения; во 2-й контрольной группе (n = 24) перевязки дополняли сеансами барботажной санации (БС) в аналогичном растворе в течение 3 минут; в опытной группе (n = 24) перевязки дополняли сеансами ПБФД в изотоническом растворе натрия хлорида с добавлением синдетного пенообразователя (рН = 5,5–6,0) в течение 3 минут во время ежедневной обработки. Рандомизацию животных проводили с использованием метода конвертов (табл. 1).

Для выполнения сеансов БС и ПБФД было разработано специальное устройство (патент RU 209244 U1, правообладатель — ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России).

Животных выводили из эксперимента на 1, 3, 7 и 10-е сутки от начала лечения гнойной раны.

С целью оценки раневого процесса и динамики заживления ран в группах исследования применяли клинические, планиметрические и лабораторные методы. Клинические методы включали в себя оценку рН раны, объема раневого отделяемого, сроков купирования отека и гиперемии, появления грануляций и эпителизации, планиметрические — оценку площади раневой поверхности по методу Л.Н. Поповой, лабораторные — оценку показателей общего анализа крови (уровней лейкоцитов, лимфоцитов,

гранулоцитов, эритроцитов и концентрации гемоглобина) и показателей окислительного стресса (малонового диальдегида (МДА), 2,4-динитрофенилгидразин-производных (ДНФГ)), а также определение бактериальной обсемененности.

Все манипуляции с лабораторными животными осуществляли в соответствии с принципами биоэтики, правилами лабораторной практики (GLP) и нормативными требованиями: Закона РФ от 14.05.1993 № 4979-1 «О ветеринарии» (с изменениями от 02.07.2021), Директивы 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского Союза «О защите животных, используемых в научных целях», ГОСТа № 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами», ГОСТа 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур», ГОСТа 33044-2014 «Принципы надлежащей лабораторной практики». Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России (протокол № 2 от 23.03.2020 г.).

Для статистической обработки данных был использован пакет программ STATGRAPHICS Centurion 18, версия 18.1.12 (Statgraphics Technologies, Inc., США). Проверку характера распределения признаков проводили с использованием критериев Шапиро – Уилка или Колмогорова – Смирнова. При распределении, отличном от нормального, данные представляли в виде ме-

дианы и интерквартильного размаха (Me [Q₁; Q₃]). Межгрупповые сравнения осуществляли методом дисперсионного анализа (ANOVA) с расчетом 95,0% доверительных интервалов. Применяли также парный и канонический корреляционный анализ. Критический уровень статистической значимости при проверке гипотез принимали равным $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении уровня рН ран на 1-е сутки после начала лечения статистически значимых различий между группами выявлено не было. На 3-е сутки от начала лечения данный показатель в опытной группе составил 7,71 [7,00; 8,81], в 1-й контрольной — 8,03 [7,45; 8,72], во 2-й контрольной — 8,19 [7,45; 8,74]. На 7-е сутки наименьший показатель был зарегистрирован в опытной группе — 5,83 [5,01; 6,54]. Следует отметить, что данный уровень рН соответствовал рН неповрежденной кожи.

При сравнении эффективности применения БС (2-я контрольная группа) и ПБФД (опытная группа) отмечались достоверные различия начиная с 1-х суток лечения. В опытной группе сокращение отделяемого до скудного было зарегистрировано спустя 78,77 [76,83; 80,97] ч от начала лечения, во 2-й контрольной группе потребовалось на 33,36 % времени больше. Купирование отека и гиперемии в опытной группе наблюдалось через 78,03 [73,67; 80,77] ч и 77,71 [75,64; 80,64] ч от начала лечения, во 2-й контрольной — через 104,09 [102,24; 105,77] ч и 102,96 [100,49; 104,84] ч соответственно. Наиболее раннее появление грануляций и эпителизации отмечалось в опытной

Таблица 1
Характеристика групп исследования
Table 1
Characteristics of the study groups

Группы исследования Research groups	Характеристика групп исследования Characteristics of research groups	Количество животных Number of animals
1-я контрольная 1st control	Без лечения Without treatment	24
2-я контрольная 2nd control	Барботажная санация Bubbling sanitation	24
Опытная Experimental	Пенный барботажно-флотационный дебридмент Foam bubbling and flotation debridement	24

группе — через 70,58 [69,56; 71,72] ч и 83,17 [81,47; 84,89] ч от начала лечения, во 2-й контрольной — через 86,87 [84,37; 89,54] ч и 104,20 [101,60; 105,79] ч соответственно.

При оценке динамики площади раневой поверхности на 1-е сутки от начала лечения статистически значимых межгрупповых различий не регистрировали. В дальнейшем наиболее высокая скорость заживления наблюдалась в опытной группе при применении ПБФД. На 3-е сутки от начала лечения площадь раневой поверхности в 1-й контрольной группе составила 58,32 [55,82; 60,82] % от исходной, во 2-й контрольной группе данный показатель был меньше на 14,68 %, а в опытной — на 22,73 %. На 7-е и 14-е сутки минимальная площадь раневого дефекта была зафиксирована в опытной группе — 16,98 [16,46; 17,63] % и 6,28 [5,58; 6,96] % соответственно.

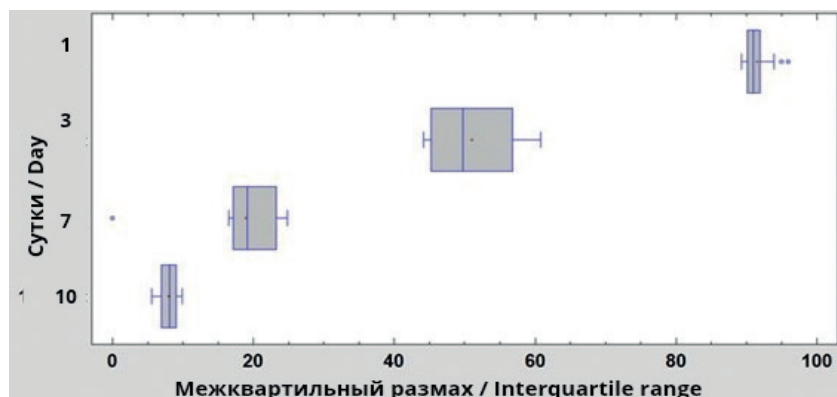
На представленном графике Box Plot (рис. 1) наглядно отражено распределение значений площади раневой поверхности по суткам наблюдения во всех сериях эксперимента. На 1-е сутки межквартильный размах во всех группах находился в пределах от 30 до 60 % при медиане около 45 %. Наибольший разброс и вариабельность данных зафиксированы на 3-и сутки исследования, при этом распределение значений внутри квантилей оставалось симметричным. По мере увеличения сроков наблюдения отмечалась выраженная и статистически значимая тенденция к

Рисунок 1

График Box Plot, отражающий динамику площади раневой поверхности в группах исследования

Figure 1

A Box Plot graph reflecting the dynamics of the wound surface area in the study groups



снижению медианных значений площади ран, а также смещение межквартильного размаха в сторону минимальных параметров (к 7-м суткам — до 16–25 %, к 10-м суткам — до 5–12 %). Полученные результаты планиметрического анализа надежно верифицируют достоверное влияние разработанной технологии обработки раневой поверхности и фактора времени на скорость эпителизации дефектов (рис. 1).

При анализе результатов общего анализа крови на 1-е сутки после начала лечения статистически значимых различий между группами выявлено не было. Для оценки выраженности воспалительного процесса изучали содержание лейкоцитов, гранулоцитов и лимфоцитов (табл. 2).

На 3-и сутки исследования в 1-й контрольной группе уровень лейкоцитов составил 24,81 [24,04; 25,61] $\times 10^9/\text{л}$, во 2-й контрольной группе он был ниже на 6,29 %, а в опытной — на 12,72 %. На 7-е и 14-е сутки отмечалось значительное снижение уровня лейкоцитов при применении БС и ПБФД. При этом наименьший показатель был зарегистрирован в опытной группе на 14-е сутки — 14,88 [14,01; 15,97] $\times 10^9/\text{л}$, что было достоверно ниже уровня во 2-й контрольной группе.

При оценке содержания лимфоцитов отмечали достоверные различия при сравнении 2-й контрольной и опытной групп с 1-й контрольной группой в течение всего периода наблюдения. На 3-и сутки в 1-й контрольной группе

Таблица 2
Динамика показателей синдрома воспаления по данным общего анализа крови, ед $\times 10^9/\text{л}$, Ме [Q₁; Q₃]

Table 2
Dynamics of indicators of inflammation syndrome according to the general blood test, units $\times 10^9/\text{l}$, Me [Q₁; Q₃]

Показатель Indicator	Сутки Day	Группы исследования / Research groups		
		1-я контрольная 1st control	2-я контрольная 2nd control	опытная experimental
Лейкоциты, $10^9/\text{л}$ Leukocytes, $10^9/\text{l}$	3	24.81 [24.04; 25.61]	23.25 [22.72; 23.83]*	22.01 [21.08; 22.64]*#
	7	25.15 [24.03; 25.99]	19.86 [18.24; 21.41]*	19 [18.21; 19.77]*
	10	24.82 [24.41; 25.57]	17.61 [17.08; 18.68]*	14.88 [14.01; 15.97]*#
Лимфоциты, $10^9/\text{л}$ Lymphocytes, $10^9/\text{l}$	3	24.98 [24.19; 25.58]	17.9 [16.59; 20.6]*	19.36 [18.29; 20.58]*
	7	24.73 [24.1; 25.59]	19.22 [17.69; 20.96]*	19.66 [18.0; 20.88]*
	10	25.17 [24.32; 25.61]	17.63 [16.04; 19.29]*	17.47 [15.5; 21.0]*
Гранулоциты, $10^9/\text{л}$ Granulocytes, $10^9/\text{l}$	3	7.83 [7.03; 8.69]	7.91 [7.53; 8.49]	6.06 [5.39; 6.79]*#
	7	7.87 [7.35; 8.62]	8.27 [7.58; 8.74]	5.93 [5.4; 6.7]*#
	10	7.87 [7.34; 8.77]	6.17 [3.61; 8.78]	5.65 [3.73; 6.72]*

Примечание. Здесь и в таблицах 4 и 5: различия статистически значимы: * — при сравнении с 1-й контрольной группой по U-критерию Манна — Уитни; # — при сравнении со 2-й контрольной группой по U-критерию Манна-Уитни.

Note. Here and in Tables 4 and 5: differences are statistically significant: * - when compared with the 1st control group according to the Mann-Whitney U-test; # - when compared with the 2nd control group according to the Mann-Whitney U-test.

концентрация лимфоцитов достигала $24,81 [24,04; 25,61] \times 10^9/\text{л}$, во 2-й контрольной она была ниже на 28,34 %, а в опытной — на 22,50 %. На 7-е сутки в 1-й контрольной группе данный показатель составил $24,73 [24,1; 25,59] \times 10^9/\text{л}$, во 2-й контрольной был ниже на 22,24 %, в опытной — на 20,50 %. Содержание лимфоцитов в 1-й контрольной группе достигало $25,17 [24,32; 25,61] \times 10^9/\text{л}$, во 2-й контрольной было ниже на 29,96 %, в опытной — на 30,59 %. Отсутствие статистически значимых различий между 2-й контрольной и опытной группами может быть ассоциировано со сходной эффективностью санации методами БС и ПБФД, обеспечивающими ускоренное купирование стресс-реакции на повреждение и стихание острой фазы воспаления.

При анализе количества гранулоцитов значимых межгрупповых различий между контрольными сериями зарегистрировано не было. На 3-и сутки исследования концентрация гранулоцитов в 1-й контрольной группе достигала $7,83 [7,03; 8,69] \times 10^9/\text{л}$, тогда как в опытной группе данный параметр был ниже на 22,61 %. На 7-е и 14-е сутки содержание гранулоцитов в 1-й контрольной группе составило $7,87 [7,35; 8,62] \times 10^9/\text{л}$ и $7,87 [7,34; 8,77] \times 10^9/\text{л}$, а в опытной — было ниже на 24,65 % и 28,21 % соответственно. Стабильное снижение пула гранулоцитов в опытной группе свидетельствует о более быстром разрешении локальной воспалительной реакции.

Для оценки взаимосвязей между концентрацией лейкоцитов, площадью раневой поверхности и сроком динамического наблюдения был проведен корреляционный анализ Пирсона (рис. 2).

Выполненный анализ выявил положительную корреляционную связь средней силы между концентрацией лейкоцитов и площадью раневой поверхности ($r = 0,6$). Данный результат свидетельствует о том, что более высокие значения лейкоцитов ассоциированы с большей площадью раневого дефекта. Это может отражать роль воспалительного процесса в замедлении заживления.

Зарегистрирована отрицательная связь средней силы между динамикой площади раневой поверхности и сроком наблюдения ($r = -0,4$). Выявленная взаимосвязь демонстрирует типичный процесс заживления ран, характе-

Рисунок 2

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона (r) между уровнем лейкоцитов, площадью раневой поверхности и сроком наблюдения
Figure 2

Matrix of Pearson correlation coefficients (r) between leukocyte level, wound surface area and follow-up period



ризующийся уменьшением площади раневого дефекта с течением времени во всех экспериментальных группах.

Следует отметить разнонаправленный характер корреляционных связей. Данные изменения полностью согласуются с патофизиологией раневого процесса. При наличии выраженного воспаления, сопровождающегося ростом концентрации лейкоцитов, отмечается замедление заживления гнойной раны, увеличение экссудации и усиление местных признаков альтерации.

Положительная корреляционная связь средней силы между концентрацией лейкоцитов и со временем от начала лечения ($r = 0,40$; $p < 0,05$) может быть обоснована спецификой динамики показателей в разных группах. В контрольных сериях высокий уровень лейкоцитоза не только сохранялся, но и нарастал на поздних сроках. В то же время в опытной группе происходило их закономерное снижение, что, вероятнее всего, связано с успешным применением технологии ПБФД.

Для исключения признаков анемического синдрома оценивали количество эритроцитов и концентрацию гемоглобина (табл. 3). При сравнении концентрации гемоглобина значимых межгрупповых различий выявлено не было.

При оценке уровня эритроцитов на 3-и сутки исследования в 1-й кон-

трольной группе данный показатель составил $7,17 [6,24; 9,38] \times 10^{12}/\text{л}$, во 2-й контрольной — был выше на 11,44 %, в опытной — ниже на 6,42 %. На 7-е сутки в 1-й контрольной группе он достигал $7,78 [6,78; 9,36] \times 10^{12}/\text{л}$, во 2-й контрольной — был ниже на 1,03 %, в опытной — на 15,04 %. На 10-е сутки уровень эритроцитов в 1-й контрольной группе составил $8,27 [6,97; 8,89] \times 10^{12}/\text{л}$, во 2-й контрольной был ниже на 18,98 %, в опытной — на 21,89 %. Следует отметить, что этот показатель во всех группах на протяжении всего исследования оставался в пределах референтных значений.

При оценке взаимосвязи между количеством эритроцитов и площадью раневой поверхности статистически значимой корреляционной связи выявлено не было (рис. 3).

Для оценки уровня окислительно-го стресса был проведен анализ содержания продуктов биохимического окисления — МДА и ДНФГ (табл. 4). На 1-е и 3-и сутки от начала лечения значимых различий между группами не установлено. На 7-е сутки исследования в 1-й контрольной группе содержание МДА составило $38,53 [61; 42,65]$ нмоль/мл, ДНФГ — $67,34 [66,29; 68,84]$ ед. опт. пл./мл; во 2-й контрольной группе эти показатели были ниже на 2,39 % и 0,04 %, а в опытной — на 14,07 % и 11,98 % соответственно. На 14-е

сутки статистически значимые различия наблюдались только при сравнении опытной группы с 1-й и 2-й контрольными по содержанию МДА. Данный показатель в опытной группе составил 22,88 [22, 32; 23, 67] нмоль/мл, тогда как в 1-й контрольной группе он был выше на 34,57 %, а во 2-й контрольной — на 34,09 %.

При оценке бактериальной обсемененности раневой поверхности на 1-е сутки от начала лечения статистически значимых различий между группами не выявлено (табл. 5). На 3-и и 7-е сутки исследования отмечали зна-

чимые различия при сравнении 2-й контрольной и опытной групп с 1-й контрольной группой. В 1-й контрольной группе уровень бактериальной обсемененности составил 5,33 [5,00; 6,00] lg КОЕ/мл экссудата, во 2-й контрольной — был ниже на 43,71 %, в опытной — на 59,29 %. На 14-е сутки исследования минимальные значения бактериальной обсемененности были зарегистрированы в опытной группе, что составило 1,50 [1,00; 2,00] lg КОЕ/мл экссудата и имело статистически значимые различия при сравнении с 1-й и 2-й контрольными группами.

Для оценки взаимосвязей между уровнем микробной обсемененности, площадью раневой поверхности и сроком наблюдения проведен ранговый корреляционный анализ Пирсона (рис. 4). Выявлена выраженная отрицательная связь между динамикой площади раневой поверхности и сутками от начала лечения гнойной раны ($r = -0,97$). Данная закономерность свидетельствует о естественном течении процесса заживления во всех группах исследования.

Зарегистрирована также положительная корреляционная связь средней

Таблица 3
Динамика показателей анемического синдрома по данным общего анализа крови, Ме [Q₁; Q₃]

Table 3
Dynamics of indicators of anemia syndrome according to the data of the general blood test, Me [Q₁; Q₃]

Показатель Indicator	Сутки Day	Группы исследования / Research groups		
		1-я контрольная 1st control	2-я контрольная 2nd control	опытная experimental
Эритроциты, ед × 10 ¹² /л Erythrocytes, units × 10 ⁹ /l	3	7.17 [6.24; 9.38]	7.99 [6.37; 9.42]	6.71 [6.26; 6.97]
	7	7.78 [6.78; 9.36]	7.7 [6.67; 8.9]	6.61 [6.22; 6.93]
	10	8.27 [6.97; 8.89]	6.7 [6.05; 8.13]	6.46 [6.21; 6.90]*
Гемоглобин, ед/л Hemoglobin, units/l	3	151.83 [136.0; 166.0]	150.17 [138.0; 163.0]	142.00 [134.0; 150.0]
	7	158.67 [131.0; 169.0]	145.83 [130.0; 171.0]	150.83 [136.0; 169.0]
	10	150.83 [130.0; 171.0]	149.5 [137.0; 162.0]	154.17 [148.0; 162.0]

* — различия статистически значимы при сравнении с 1-й контрольной группой по U-критерию Манна — Уитни.

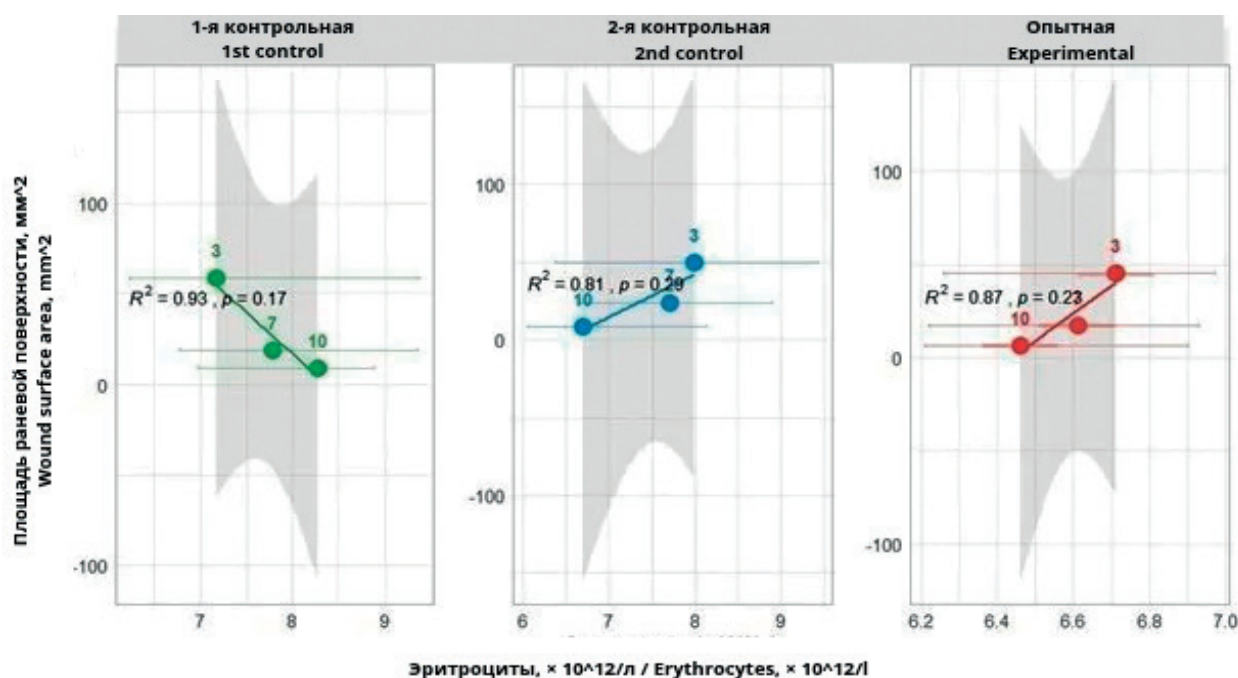
* — the significance of differences when compared with the 1st control group according to the Mann-Whitney U-test.

Рисунок 3

Корреляционный анализ зависимости площади раневого дефекта от уровня эритроцитов

Figure 3

Correlation analysis of the dependence of the area of the wound defect on the level of red blood cells



Примечание. Точки — медианы, кресты — 95% ДИ, цифры — сутки наблюдения.

Note. Dots are medians, crosses are 95% CI, numbers are days of observation.

силы между динамикой площади раневой поверхности и уровнем бактериальной обсемененности раны ($r = 0,57$). Обнаруженное соотношение указывает на то, что более высокая микробная нагрузка ассоциирована с большей площадью раневого дефекта, и подтверждает роль бактериальной контаминации в замедлении процессов регенерации. Умеренная отрицательная связь при корреляционном анализе была установлена между бактериальной обсемененностью и временем от начала лечения ($r = -0,45$). Данный результат указывает на значимость снижения микробной нагрузки в процессе заживления.

Проведен корреляционный анализ Пирсона для оценки взаимосвязей между изучаемыми показателями: сроком наблюдения, уровнем лейкоцитов, бактериальной обсемененностью, pH ран и площадью раневой поверхности (рис. 5).

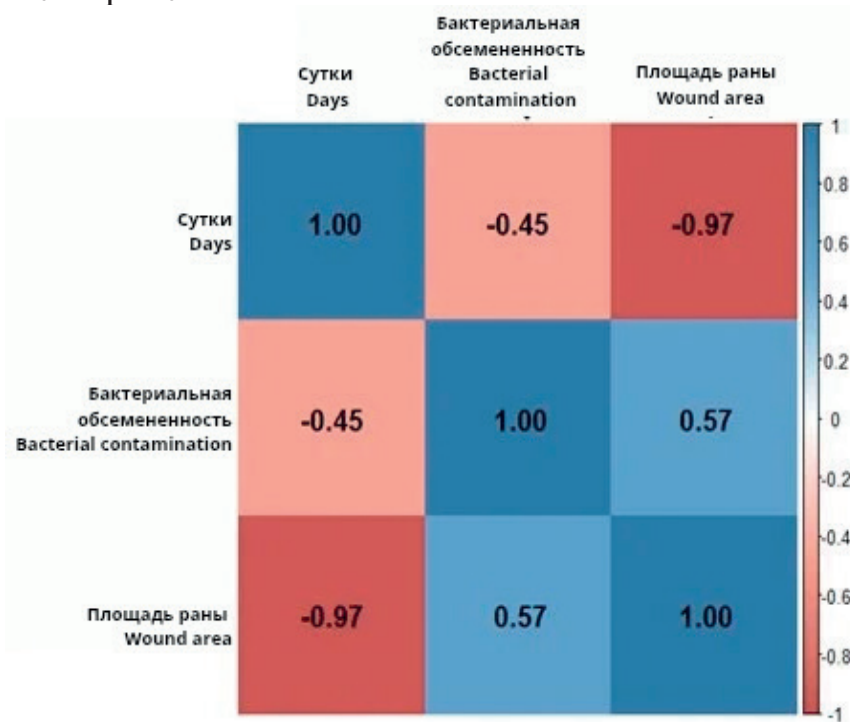
Выявлен ряд закономерных взаимосвязей. Наиболее сильные отрицательные корреляции обнаружены между сроком наблюдения и pH раневой среды ($r = -0,96$), а также между сроком наблюдения и площадью раневой поверхности ($r = -0,95$). Это отражает физиологическую динамику заживления: с течением времени происходит закономерный сдвиг pH раневой среды в кислую сторону и сокращение площади раневого дефекта. Зарегистрированы также отрицательные корреляционные связи времени от начала лечения с бактериальной обсемененностью ($r = -0,76$) и концентрацией лейкоцитов ($r = -0,66$). Полученные данные свидетельствуют о снижении микробной нагрузки и стихании воспалительной реакции по мере заживления.

Рисунок 4

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона (r) между уровнем бактериальной обсемененности, площадью раневой поверхности и сроком наблюдения

Figure 4

Matrix of Pearson correlation coefficients (r) between the level of bacterial contamination, the area of the wound surface and the period of observation



Анализ взаимосвязей между показателями, характеризующими патофизиологию раневого процесса, демонстрирует выраженные положительные корреляционные связи. Динамика изменения pH раневой среды ассоциирована с площадью раневой поверхности ($r = 0,90$) и бактериальной обсемененностью ($r = 0,73$). Полученные данные подтверждают, что защелачивание раневой среды коррелирует с длительным течением раневого процесса, повышением интен-

сивности воспаления и замедлением заживления.

Следует отметить взаимосвязь бактериальной обсемененности с другими показателями. Наличие выраженной связи с площадью раневой поверхности ($r = 0,88$) указывает на прямую зависимость: чем выше микробная нагрузка, тем обширнее раневой дефект и длительнее процесс заживления. Взаимосвязь бактериальной обсемененности с концентрацией лейкоцитов ($r = 0,83$) демонстрирует закономерный

Таблица 4
Динамика показателей окислительного стресса в группах исследования, Me [Q₁; Q₃]
Table 4
Dynamics of oxidative stress indicators in the study groups, Me [Q₁; Q₃]

Показатель Indicator	Сутки Day	Группы исследования / Research groups		
		1-я контрольная 1st control	2-я контрольная 2nd control	опытная experimental
Малоновый диальдегид, нмоль/мл Malonic dialdehyde, nmol/ml	3	35.13 [32.61; 37.79]	34.39 [32.39; 35.97]	32.34 [29.64; 34.99]
	7	38.53 [32.61; 42.65]	37.61 [34.38; 40.31]	33.11 [31.57; 34.30]#
	10	30.79 [29.14; 33.02]	30.68 [29.31; 32.9]	22.88 [22.32; 23.67]*#
2,4-динитрофенилгидразин-производные, опт пл/мл 2,4-dinitrophenylhydrazine derivatives, wholesale pl/ml	3	68.90 [67.13; 71.02]	68.98 [67.84; 69.79]	67.34 [65.11; 70.6]
	7	67.34 [66.29; 68.84]	67.31 [66.1; 70.7]	59.27 [56.28; 62.06]*#
	10	58.91 [57.14; 60.13]	56.02 [52.49; 60.04]	55.29 [52.4; 60.04]

патофизиологический ответ организма на наличие гнойного очага и бактериальную контаминацию.

Наличие взаимосвязи бактериальной обсемененности с pH раневой среды ($r = 0,73$) свидетельствует о влиянии pH на контаминацию раневой поверхности, защелачивание которой может способствовать усугублению течения раневого процесса.

Количество лейкоцитов, являющееся маркером ответа макроорганизма на воспаление, коррелирует с бактериальной обсемененностью ($r = 0,83$). Это патофизиологически обосновано и отражает местную защитную реакцию на наличие гнойного очага. Кроме того, отмечена умеренная корреляционная связь между концентрацией лейкоцитов и pH раневой среды ($r = 0,64$).

Площадь раневой поверхности, являющаяся одним из основных интегральных показателей заживления, демонстрирует выраженные корреляционные связи со всеми изучаемыми факторами. Помимо уже упомянутой связи со сроками наблюдения ($r = -0,95$), она тесно коррелирует с pH раневой среды ($r = 0,90$) и бактериальной обсемененностью ($r = 0,88$), а также умеренно связана с концентрацией лейкоцитов ($r = 0,65$). Данные взаимосвязи отражают значимость многофакторного влияния на заживление раны.

Кластеризация изучаемых переменных на корреляционной матрице выявила две основные группы показателей. Первый кластер формируют сроки наблюдения, которые отрицательно коррелируют со всеми остальными переменными. Второй кластер включает pH раневой среды, площадь раневой поверхности, концентрацию лейкоцитов и бактериальную обсемененность, образующие между собой сеть положительных корреляций. Такое разделение подчеркивает двухфакторную структуру процесса заживления: фактор времени, определяющий общую динамику, и фактор текущего состояния, характеризующий патофизиологические особенности течения раневого процесса.

Полученные корреляционные взаимосвязи формируют логичную патофизиологическую картину, согласно которой эффективное заживление (уменьшение площади раны) сопровождается снижением pH (закислением среды), уменьшением бактериальной

Рисунок 5

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона (r) между уровнем бактериальной обсемененности, площадью раневой поверхности, уровнем лейкоцитов, pH ран и сроком наблюдения. Размер круга пропорционален силе корреляции, цвет указывает на направление связи: синий — положительная корреляция, красный — отрицательная. Все коэффициенты статистически значимы ($p < 0,05$)

Figure 5

Matrix of Pearson correlation coefficients (r) between the level of bacterial contamination, wound surface area, leukocyte level, wound pH, and follow-up period. The size of the circle is proportional to the strength of the correlation. The color indicates the direction of the relationship: blue is a positive correlation, red is a negative one. All coefficients are statistically significant ($p < 0.05$)



обсемененности и снижением концентрации лейкоцитов, что было наиболее выражено при применении технологии ПБФД (опытная группа). Напротив, замедленное заживление характеризуется высокими значениями всех этих показателей (1-я контрольная группа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология ПБФД раневой поверхности, основанная на реализации эффектов барботаж, флотации и воздействия синтетного пенообразователя на мягкие ткани. Для реализации метода сконструировано оригинальное устройство (патент RU 209244 U1),

Таблица 5
Уровень бактериальной обсемененности в группах исследования, микробных тел на мл экссудата, Ме [Q₁; Q₃]

Table 5
The level of bacterial contamination in the study groups, microbial bodies per ml of exudate, Me [Q₁; Q₃]

Сутки Day	Группы исследования / Research groups		
	1-я контрольная 1st control	2-я контрольная 2nd control	опытная experimental
1	9.50 [9; 10]	9.33 [9; 10]	9.00 [8; 10]
3	7.17 [6; 8]	4.67 [4; 5]*	3.67 [3; 5]*
7	5.33 [5; 6]	3.00 [2; 4]*	2.17 [2; 3]*
10	5.33 [4; 6]	3.33 [3; 4]	1.50 [1; 2]*#

обеспечивающее проведение качественной санации раневого ложа.

Применение разработанной технологии при лечении гнойных ран позволило создать условия для ускорения регенерации за счет оптимизации рН среды, что привело к сокращению сроков купирования локального отека на 24,33 % и гиперемии на 24,52 % по сравнению с изолированным использованием БС.

Использование ПБФД способствовало снижению интенсивности воспалительной реакции за счет ускоренного очищения раневой поверхности,

обеспечивало равномерное развитие полноценной грануляционной ткани и приводило к раннему закрытию раневого дефекта: редукция площади достигала 93,72 % на 14-е сутки от начала лечения.

Проведенный корреляционный анализ Пирсона подтвердил, что процесс заживления ран представляет собой комплексное взаимодействие временных, микробиологических, гематологических и физико-химических факторов, тесно взаимосвязанных друг с другом. Наиболее сильные связи обнаружены между сроком наблюдения и

рН среды, сроком наблюдения и площадью раны, а также между бактериальной обсемененностью и площадью дефекта, что подчеркивает ключевую роль данных параметров в процессе регенерации.

Информация о финансировании и конфликте интересов

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Abaev Yu. K. Modern features of the etiology and pathogenesis of wound infection. *Bulletin of Surgery named after I. I. Grekov*. 2021; 180(2):107-112. Russian (Абаев Ю. К. Современные особенности этиологии и патогенеза раневой инфекции // *Вестник хирургии имени И. И. Грекова*. 2021; Т. 180, № 2. С. 107–112.)
2. Eriksson E, Liu PY, Schultz GS, Martins-Green MM, Tanaka R, Weir D, et al. Chronic wounds: treatment consensus. *Wound Repair Regen*. 2022;30(2):156-171. DOI: 10.1111/wrr.12994.
3. Atepileva A, Ogay V, Kudaibergen G, Kaukabaeva G, Nurkina A, Mukhambetova A, et al. Exploring the antibacterial and regenerative properties of a two-stage alginate wound dressing in a rat model of purulent wounds. *Biomedicine*. 2024;12(9):2122. DOI: 10.3390/biomedicine12092122.
4. Andreev AA, Glukhov AA, Lobas SV, Ostroushko AP. Experimental testing of the method of programmed barbotage wound debridement. *Bulletin of Experimental and Clinical Surgery*. 2016; 9(4):314-321. Russian (Андреев А. А., Глухов А. А., Лобас С. В., Остроушко А. П. Экспериментальная апробация метода программной барботажной санации ран // *Вестник экспериментальной и клинической хирургии*. 2016. Т. 9, № 4. С. 314–321. DOI: 10.18499/2070-478X-2016-9-4-314-321.)
5. Armstrong DG, Boulton AJM, Bus SA. Diabetic foot ulcers: a review. *JAMA*. 2023; 330(1): 62–75.
6. Galstyan GR, Antsiferov MB, Guryeva IV. Diabetic foot syndrome: clinical guidelines and treatment algorithms. *Diabetes mellitus*. 2023; 26(2):112-126. Russian (Галстян Г. Р., Анциферов М. Б., Гурьева И. В. Синдром диабетической стопы: клинические рекомендации и алгоритмы лечения // *Сахарный диабет*. 2023. Т.26, № 2. С. 112–126.)
7. Mikhailova EA, Gusmanov VG. Epidemiology of purulent-septic complications in a multidisciplinary hospital. *Modern problems of health care and medical statistics*. 2022; (3):124-136. Russian (Михайлова Е. А., Гусманов В. Г. Эпидемиология гнойно-септических осложнений в многопрофильном стационаре // *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*. 2022. № 3. С. 124–136.)
8. Berrios-Torres SI, Umscheid CA, Bratzler DW, et al. Centers for disease control and prevention guideline for the prevention of surgical site infection, 2023 update. *JAMA Surgery*. 2023; 158(5): e234567.
9. World Health Organization. Global guidelines for the prevention of surgical site infection. 2nd ed. Geneva: WHO Press. 2023. 210 p.
10. Zabaglo M, Leslie SW, Sharman T. Postoperative wound infections. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2024.
11. Gillespie BM, Kang E, Roberts S, et al. The impact of surgical site infections on hospital length of stay and costs: a systematic review. *International Journal of Surgery*. 2021; 92: 106025
12. Zimlichman E, Henderson D, Tamir O. The economic burden of surgical site infections: a systematic review. *Journal of Hospital Infection*. 2024; 136: 45–54.
13. Guest JF, Fuller GW, Vowden P. Health economic burden of different wound types in the UK. *BMJ Open*. 2023; 13: 4: e067892.

Сведения об авторах:

Остроушко Антон Петрович — к.м.н., доцент, доцент кафедры общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия; ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036; врач-хирург ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Воронеж»; пер. Здоровья, д. 2, г. Воронеж, Россия, 394024. <http://orcid.org/0000-0003-3656-5954>

Глухов Александр Анатольевич — д.м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России; ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036. <http://orcid.org/0000-0001-9675-7611>

Information about authors:

Ostroushko Anton Petrovich — candidate of medical sciences, associate professor, associate professor of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Voronezh, Russia; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036; surgeon, Clinical Hospital "RZhD-Medicine", Voronezh; Pereulok Zdorovya, 2, Voronezh, Russia, 394024. <http://orcid.org/0000-0003-3656-5954>

Glukhov Alexander Anatolyevich — MD, PhD, professor, chief of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036. <http://orcid.org/0000-0001-9675-7611>

Андреев Александр Алексеевич — д.м.н., доцент, профессор кафедры общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России; ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036. <http://orcid.org/0000-0001-8215-7519>

Лаптиёва Анастасия Юрьевна (автор для переписки) — к.м.н., доцент кафедры общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России; ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036; врач-хирург, ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Воронеж»; пер. Здоровья, д. 2, г. Воронеж, Россия, 394024. <http://orcid.org/0000-0002-3307-1425>
E-mail: laptievaa@mail.ru

Земсков Андрей Михайлович — студент 4-го курса лечебного факультета, ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России; ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036. <http://orcid.org/0009-0000-8193-1939>

Подвигина Виктория Сергеевна — студентка 4-го курса лечебного факультета ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036. <http://orcid.org/0000-0002-3792-9791>

Статья поступила в редакцию 30.03.2026

Рецензирование пройдено 22.04.2026

Подписано в печать 30.05.2026

Andreev Alexander Alekseevich — MD, PhD, associate professor, professor of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036. <http://orcid.org/0000-0001-8215-7519>

Laptiyova Anastasia Yuryevna (corresponding author) — candidate of medical sciences, associate professor of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036; surgeon, Clinical Hospital "RZHD-Medicine", Voronezh; Pereulok Zdorovya, 2, Voronezh, Russia, 394024. <http://orcid.org/0000-0002-3307-1425>
E-mail: laptievaa@mail.ru

Zemskov Andrey Mikhailovich — 4th year student of the Faculty of Medicine, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036. <http://orcid.org/0009-0000-8193-1939>

Podvigina Victoria Sergeevna — 4th year student of the Faculty of Medicine, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; Studencheskaya St., 10, Voronezh, Russia, 394036. <http://orcid.org/0000-0002-3792-9791>

Received 30.03.2026

Review completed 22.04.2026

Passed for printing 30.05.2026

