

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАРОФОРЕЗА ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ГЕНЕРАЛИЗОВАННОМ ПАРОДОНТИТЕ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

DOI: 10.17691/stm2022.14.4.05

УДК 616.314.17–008.1–085:004.942

Поступила 10.04.2022 г.



**И.И. Антонов**, аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии<sup>1</sup>;  
**А.Б. Дымников**, к.м.н., доцент кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии<sup>1</sup>;  
**А.А. Мураев**, д.м.н., профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии<sup>1</sup>;  
**Л.А. Ананьева**, аспирант кафедры пародонтологии<sup>2</sup>;  
**С.Ю. Иванов**, д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН, зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии  
 и хирургической стоматологии<sup>1</sup>; зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198;

<sup>2</sup>Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова,  
 ул. Делегатская, 20/1, Москва, 127473;

<sup>3</sup>Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова  
 (Сеченовский Университет), ул. Трубецкая, 8/2, Москва, 119991

**Цель исследования** — оценить возможности применения барофореза для доставки жидкостно-воздушных лекарственных веществ в десну с использованием математической модели взаимодействия лекарственной смеси с тканями пародонта.

**Материалы и методы.** Решение задачи предварялось построением геометрической CAD-модели аппарата и насадки для барофореза, включая геометрию насадки и форсунок. Для построения CAD-геометрии использовали пакет программ Ansys SpaceClaim.

**Результаты.** Численное моделирование при решении задачи поиска оптимального расстояния от сопла до поверхности десны показало, что при расстоянии 5 мм объемная доля жидкости в смеси составляет 18–20%. Смесь фактически пробивает десну, заполняя 0,8 мм толщины и распространяясь симметрично в стороны на расстояние до 3 см, образуя полость. При расстоянии 10 мм от сопла до поверхности десны объемная доля жидкости в смеси вблизи десны лежит в узком диапазоне значений — 5–7%. Смесь касается поверхности десны, попадая вовнутрь незначительно — на расстояние 0,30–0,45 мм. При расстоянии 15 мм от сопла до поверхности десны объемная доля жидкости в смеси вблизи десны лежит в диапазоне 2–5%. Смесь незначительно касается поверхности десны, попадая вовнутрь на расстояние до 0,2 мм, фактически не оказывая на десну никакого влияния.

**Заключение.** Разработанная математическая модель подтвердила возможность использования барофореза при лечении хронического генерализованного пародонтита. Оптимальным расстоянием от насадки до поверхности следует считать 10–15 мм. Такое расстояние является безопасным и позволяет доставить лекарственный препарат на глубину до 0,45 мм.

**Ключевые слова:** барофорез; пародонтит; пародонтология.

**Как цитировать:** Antonov I.I., Dymnikov A.B., Muraev A.A., Ananyeva L.A., Ivanov S.Yu. Application of barophoresis in chronic generalized periodontitis: a mathematical substantiation. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2022; 14(4): 43, <https://doi.org/10.17691/stm2022.14.4.05>

## English

## Application of Barophoresis in Chronic Generalized Periodontitis: a Mathematical Substantiation

**I.I. Antonov**, PhD Student, Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry<sup>1</sup>;  
**A.B. Dymnikov**, MD, PhD, Associate Professor, Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry<sup>1</sup>;  
**A.A. Muraev**, MD, DSc, Professor, Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry<sup>1</sup>;  
**L.A. Ananyeva**, PhD Student, Department of Periodontology<sup>2</sup>;  
**S.Yu. Ivanov**, MD, DSc, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,  
 Head of the Department of Maxillofacial Surgery and Surgical Dentistry<sup>1</sup>; Head of the Department  
 of Maxillofacial Surgery<sup>3</sup>

**Для контактов:** Антонов Илья Ильич, email: [antil@inbox.lv](mailto:antil@inbox.lv)

<sup>1</sup>Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia;

<sup>2</sup>A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, 20/1 Delegatskaya St., Moscow, 127473, Russia;

<sup>3</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 8/2 Malaya Trubetskaya St., Moscow, 119991, Russia

**The aim of the study** was to evaluate the use of barophoresis for the delivery of liquid-air drug substances to the gums using a mathematical model of the interaction of the drug mixture with periodontal tissues.

**Materials and Methods.** The solution to the problem was preceded by generation of a geometric CAD model of the device and nozzle for barophoresis, including the nozzle and injector geometry. The Ansys SpaceClaim software package was used to generate the CAD geometry.

**Results.** When solving the problem of finding the optimal distance from the nozzle to the gum surface, the numerical modeling showed that at a distance of 5 mm, the volume fraction of liquid in the mixture is 18–20%. The mixture actually breaks through the gum, filling 0.8 mm of the gum thickness and spreading symmetrically to the sides at a distance of up to 3 cm, forming a cavity. At a distance of 10 mm from the nozzle to the gum surface, the liquid volume fraction in the mixture close to the gum lies in a narrow range of values of 5 to 7%. The mixture touches the surface of the gums, penetrating slightly — at a distance of 0.30–0.45 mm. At a distance of 15 mm from the nozzle to the gum surface, the volume fraction of liquid in the mixture near the gum lies in the range of 2–5%. The mixture slightly touches the gum surface, getting inside at a distance of up to 0.2 mm, having practically no effect on the gum.

**Conclusion.** The developed mathematical model confirmed the feasibility of application of barophoresis in the treatment of chronic generalized periodontitis. The optimal distance from the nozzle to the surface should be considered to be 10–15 mm. This distance is safe and allows the drug delivery to a depth of 0.45 mm.

**Key words:** barophoresis; periodontitis; periodontology.

## Введение

Пародонтит — мультифакторное заболевание опорно-удерживающего аппарата зуба, вызванное бактериальной инфекцией. По данным ВОЗ, его распространенность достигает 98%. Существуют разные формы проявления пародонтита: острая локализованная форма встречается редко, генерализованный хронический процесс, протекающий как чередование фаз обострения и ремиссии, — чаще.

Признаком деструктивных изменений, вызванных воспалительным процессом, является резорбция костной ткани межзубных костных перегородок и, как следствие, формирование надкостных или внутрикостных патологических карманов в зависимости от преобладающего типа резорбции костной ткани — горизонтального или вертикального.

Пародонтальный карман — пространство, ограниченное поверхностью корня зуба и костной стенкой альвеолы, которое заполнено прикрепленными со стороны корня поддесневым зубным камнем и инфицированным цементом, а также грануляционной незрелой соединительной тканью, ограничивающей костную ткань от микробного агента. Причиной инициации воспалительного процесса и рассасывания костной ткани являются пародонтопатогены, находящиеся в поддесневом зубном кармане.

К клиническим признакам обострения хронического пародонтита относятся кровоточивость и отечность десны, гноетечение, присутствие над- и поддесневых зубных отложений, подвижность зубов, потеря пародонтального прикрепления.

Лечение пародонтита в зависимости от степени тяжести включает три основных этапа: консервативная терапия; хирургическое лечение; динамическое

наблюдение и поддерживающее лечение. Цель лечения — перевести воспаление из стадии обострения в стадию длительной контролируемой ремиссии и снизить риски дальнейшей утраты опорных тканей для предотвращения развития риска потери зубов.

Самый распространенный вариант консервативного лечения пародонтита — закрытый кюретаж пародонтальных карманов. Его задачей является максимальное снижение концентрации пародонтопатогенной микрофлоры за счет механического удаления поддесневых зубных отложений при помощи кюрет Грейси и ультразвуковых насадок.

Системное и местное введение лекарств является важным методом доставки лечебных препаратов. В последние полвека применение системного введения при лечении инфекций полости рта показало некоторый положительный эффект. Однако системная доставка лекарств может приводить к таким проблемам, как дисбактериоз и плохое биораспределение. Кроме того, для достижения и поддержания эффективной концентрации препарата обычно вводят высокие дозы, что может привести к развитию его токсичности, желудочно-кишечной непереносимости и лекарственной устойчивости. Из-за этих очевидных недостатков системного введения для улучшения профилактики и лечения пародонтита крайне необходимо использовать локальные системы доставки лекарств для размещения их непосредственно в пародонтальном кармане. Это позволяет обеспечить высокую концентрацию активных препаратов в течение достаточно длительного периода времени. Локальные средства доставки лекарств проявляют свой лечебный эффект главным образом за счет введения трех типов препаратов: антибактериальных (волокна, полоски и пленки, микросферы, нано-

системы, гели); модуляторов воспаления (пленки, наносистемы, гели); средств, восстанавливающих альвеолярную кость и ткани, — для лечения периодонтита (мембраны, скаффолды, микросферы, гели, наносистемы) [1].

В последнее время начинает широко применяться бесконтактная аппаратная методика — барофорез. Система работает со сжатым газом, воздухом, любой жидкой средой или их смесью.

Барофорез впервые стал использоваться в дерматологии. В частности, система трансдермальной доставки JetPeel (микрокапли 5–20 мкм, давление — 7 атм, скорость — 200 м/с) была опробована для местного применения при лечении андрогенетической алопеции [2]. Участки кожи головы обрабатывали один раз в неделю в течение трех месяцев. В состав воздействующей аэрозоли включали миноксидил, Mr. Care Hair Vital Ampoule и Mr. Care Hair Vital Ampoule plus. Авторами получены предварительные положительные результаты, которые требуют дальнейших исследований.

Широкое применение барофорез нашел в косметологии: при дермоабразии, удалении пигментных пятен, разглаживании мелких морщин, очищении кожи, сдавливании расширенных пор, гидратации и оксигенации дермы и эпидермиса, улучшении реологии микроциркуляции, дермального лимфодренажа, а также для трансдермальной доставки лекарств струйным способом [3].

Данных о применении барофореза в стоматологии мы не обнаружили. Очевидным является то, что режимы воздействия жидкостно-воздушной смеси на кожу должны отличаться от воздействия на слизистую оболочку в силу различного строения и толщины рогового слоя. Поэтому, прежде чем применять систему барофореза на слизистой оболочке, необходимо определить условия и последствия воздействия на нее жидкостно-воздушной смесью.

**Цель исследования** — оценить возможности применения барофореза для доставки жидкостно-воздушных лекарственных веществ в десну с использованием математической модели взаимодействия лекарственной смеси с тканями пародонта.

## Материалы и методы

Решение задачи предварялось построением геометрической CAD-модели аппарата и насадки для барофореза, включая геометрию насадки и форсунок. Для построения CAD-геометрии использовали пакет программ Ansys SpaceClaim.

**Принцип работы аппарата.** Работа аппарата, адаптированного под стоматологическую установку (насадка с капельной системой + шланги длиной 3 м) для барофореза, заключается в следующем. Смесь водорастворимой жидкости и кислорода нагнетается в три открытых сужающихся–расширяющихся канала Вентури, которые разгоняют капли до скоро-



Рис. 1. Общий вид аппарата для барофореза

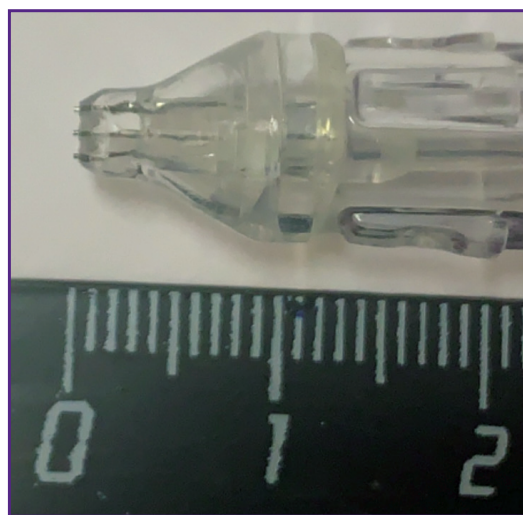


Рис. 2. Форма и размер конфузорного выхода

сти 200 м/с на выходе, тем самым создавая мощную микрокапельную струю жидкость–воздух диаметром от 5 до 200 мкм в зависимости от расстояния между насадкой и десной — от 5 до 15 мм. Мощность распыления, создаваемая источником сжатого воздуха, подается под давлением 7 атм и смешивается с жидкостью в конфузорном выходе. Аппарат приводится в действие ножным переключателем.

Общий вид аппарата показан на рис. 1. Длина насадки составляет 15 см, шаг между каналами Вентури — 1 мм, диаметр — 0,8 мм, диаметр воздушного канала — 5 мм. Конфузорный выход для концентрации воздушного потока представлен на рис. 2.

**3D-модель насадки для барофореза и воздействия жидкостно-воздушной смеси на десну.** Для математического моделирования процесса формирования жидкостно-воздушно смеси в конфузорном выходе насадки и расчетов воздействия данной смеси на десну были созданы трехмерные модели насадки и челюсти реальных размеров (рис. 3). Модель насадки построена в программе Ansys SpaceClaim, модель

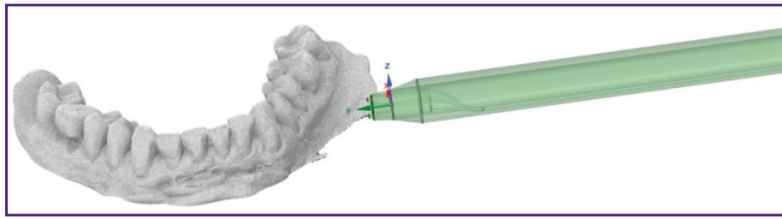


Рис. 3. 3D-модель насадки и нижней челюсти

челюсти с десной получена методом оптического сканирования зубного ряда и альвеолярной части нижней челюсти в полости рта с использованием 3D-сканера 3Shape (Дания).

Полиэдрическая неструктурированная контрольно-объемная расчетная сетка (рис. 4) строилась на базе CAD-геометрии насадки и состояла из ~2 млн. контрольных объемов, в области выдува реализовано сгущение элементов. На поверхностях границ области типа «стенка» реализован призматический слой из 15 слоев с относительным коэффициентом роста для корректного описания пограничного слоя исходя из требований модели турбулентности  $k-\omega$  SST.

Скорость истечения воздуха принималась равной  $V_G=300$  м/с, жидкости —  $V_L=7$  м/с. Объемный расход

жидкости —  $0,00035$  м<sup>3</sup>/с, ~0,22 л/мин, общий расход смеси жидкость + воздух — 2,67 кг/с.

Задача решалась в натурном масштабе 1:1 в стационарной постановке, с использованием допущения границы симметрии в решателе, основанном на давлении (pressure-based solver) пакета Ansys Fluent.

Поскольку предполагалось использование двух фаз — жидкости с каплями постоянного диаметра  $d=1 \cdot 10^{-5}$  м и воздуха, применяли многофазную модель гомогенной смеси. Тепломассоперенос не учитывался. Плотность воздуха с учетом высокой скорости потока принимали как плотность идеального газа с вязкостью по модели Сазерленда, свойства жидкости считали стандартными. Расчет проводили для стандартных условий:  $P=10^5$  Па,  $T=293,15$  К.

Уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу и замыкаемые моделью турбулентности  $k-\omega$  SST, решали итерационно до сходимости, которая наступала через 256 шагов. И временная, и пространственная дискретизация контрольных объемов обеспечивались расчетными схемами второго порядка точности.

Для определения глубины проникновения смеси в

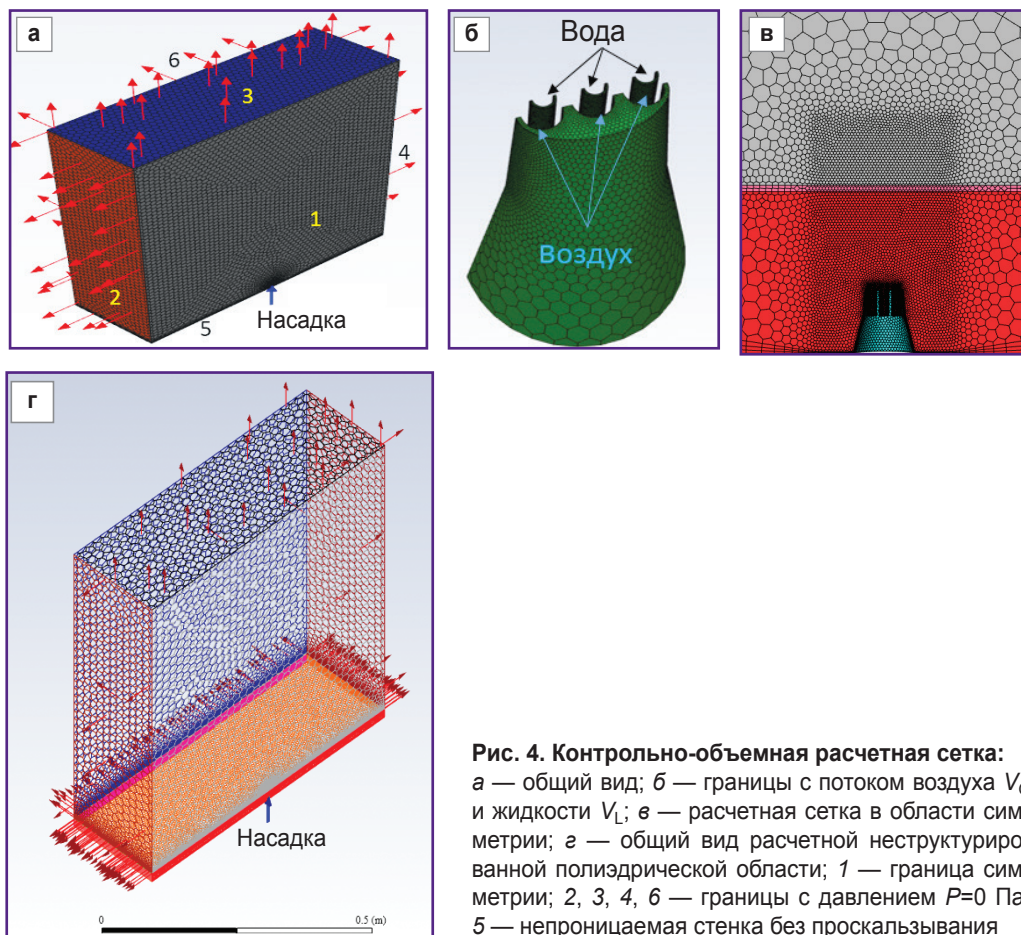


Рис. 4. Контрольно-объемная расчетная сетка: а — общий вид; б — границы с потоком воздуха  $V_G$  и жидкости  $V_L$ ; в — расчетная сетка в области симметрии; г — общий вид расчетной неструктурированной полиэдрической области; 1 — граница симметрии; 2, 3, 4, 6 — границы с давлением  $P=0$  Па; 5 — непроницаемая стенка без проскальзывания

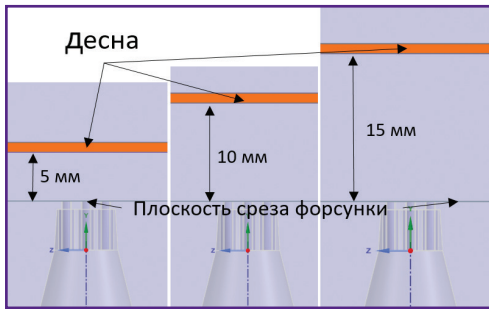


Рис. 5. Расчетные случаи взаимоположения насадки и десны

десну при различных отдалениях насадки от поверхности десны (от 5 до 15 мм) с помощью инструментов численного CFD-моделирования были рассчитаны три трехмерные идентичные расчетные области с разным отдалением  $L$  десны от плоскости среза форсунок (рис. 5).

Тип и размеры расчетных областей были унифицированы. Кроме того, для уточнения характера течения смеси и ее взаимодействия с десной был использован цилиндрический объект BOI (body of influence), значительно повышающий плотность расчетной сетки в сечном регионе, но не влияющий на геометрию объектов интереса — насадку и десну.

Десна в такой расчетной постановке моделируется с использованием модели пористой среды толщиной 1 мм, занимая всю площадь поперек расчетной области. Течение жидкостно-воздушной смеси внутри пористой среды описывается эмпирическим законом Дарси [4, 5].

В этом подходе число Рейнольдса — безразмерная величина, описывающая взаимосвязь между инерционными силами по отношению к вязким силам. Оно рассчитывается как функция размера пор или диаметр частиц  $d_p$ , составляющих пористую среду:

$$Re = \frac{\rho v_s d_p}{\eta}$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $v_s$  — вектор поверхностной скорости жидкости [6];  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости.

Из этих условий следует, что член уравнения сохранения импульса относительно изменения давления в физической области для жидкости, протекающей через изотропную пористую среду, описывается как

$$\Delta P = -\frac{\eta \bar{v}_s}{K}$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости;  $K$  — проницаемость пористой среды,  $m^2$ ;  $v_s$  — вектор поверхностной скорости жидкости, который определяет пористую среду как непрерывную и пренебрегает влиянием геометрических особенностей внутренней структуры пористой среды.

Проницаемость пористой среды  $K$  (в  $m^2$ ) может быть рассчитана по уравнению

$$K = \eta \frac{q\phi^3 \cdot L}{\Delta P \cdot F}$$

где  $q\phi^3$  — объемный расход флюида (дебит),  $m^3/c$ ;  $\eta$  — динамическая вязкость флюида;  $Pa \cdot c$ ,  $\Delta P = P_1 - P_2$  — перепад давления,  $Pa$ ;  $L$  — длина образца пористой среды,  $m$ ;  $F$  — площадь фильтрации,  $m^2$ .

При этом стоит отметить, что в пакете Ansys Fluent используется величина  $1/K$ .

В рамках решения текущей задачи с учетом отсутствия в открытых источниках данных о проницаемости десны значение пористости было принято как  $\phi = 0,1$ , а обратную проницаемость  $1/K$  считали анизотропной, так, чтобы ее значение по нормали к десне (ось  $Y$ ) превышало соответствующие значения на осях  $X, Z$ .

### Результаты математического моделирования

По результатам сошедшегося итеративного процесса решения задачи были получены следующие результаты при отдалении насадки от десны на расстояния  $L = 5, 10, 15$  мм (рис. 6–11).

На рис. 6 и 7 отображены картины распределения

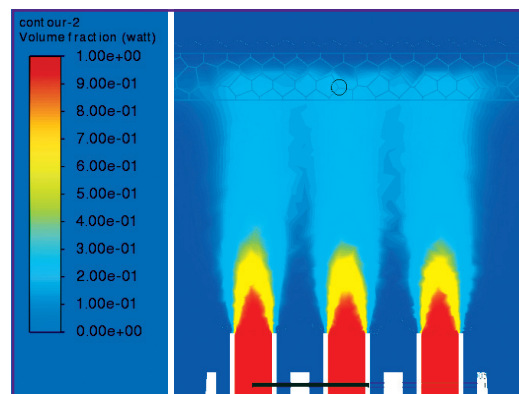


Рис. 6. Распределение объемной доли жидкости при  $L = 5$  мм

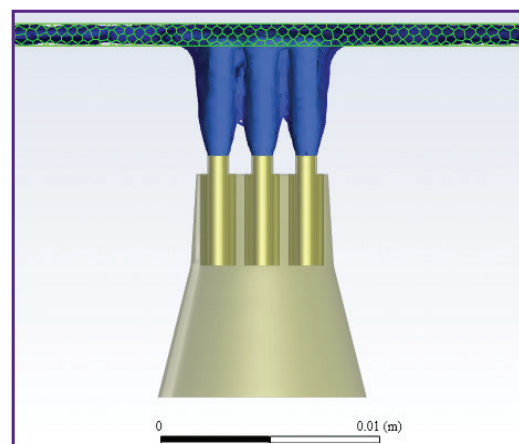


Рис. 7. Распределение изоповерхностей объемной доли жидкости в диапазоне 18–20% при  $L = 5$  мм

объемной доли жидкости в смеси (процентное отношение доли жидкости в смеси по отношению к сумме компонентов) при  $L=5$  мм. При этом объемная доля жидкости вблизи десны распределяется в диапазоне 18–20%, смесь фактически пробивает десну, заполняя 0,8 мм толщины и распространяясь симметрично в стороны до 3 см, образуя полость. Таким образом, расстояние  $L=5$  мм от форсунок до десны необходимо считать критичным и травмоопасным, что коррелирует с медицинской практикой.

На рис. 8 и 9 отображено распределение объемной

доли жидкости в смеси при  $L=10$  мм. Вблизи десны объемная доля жидкости распределяется в узком диапазоне 5–7%. Смесь касается поверхности десны, незначительно попадая вовнутрь на 0,30–0,45 мм. Таким образом жидкость безопасно доставляется внутрь десны, не травмируя пациента.

На рис. 10 показано распределение объемной доли жидкости в смеси при наибольшем удалении насадки от поверхности десны ( $L=15$  мм). В этом случае объемная доля жидкости вблизи десны распределяется в диапазоне 2–5%. Смесь незначительно касается

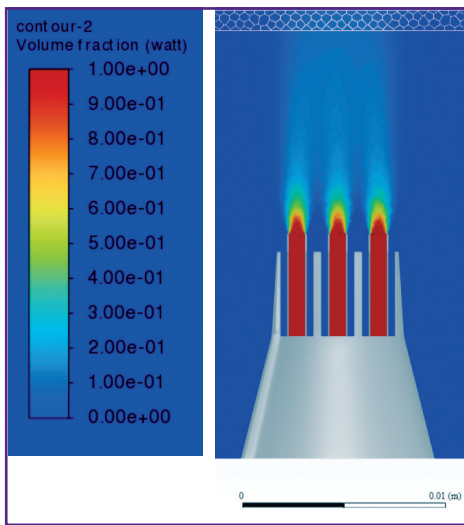


Рис. 8. Распределение объемной доли жидкости при  $L=10$  мм

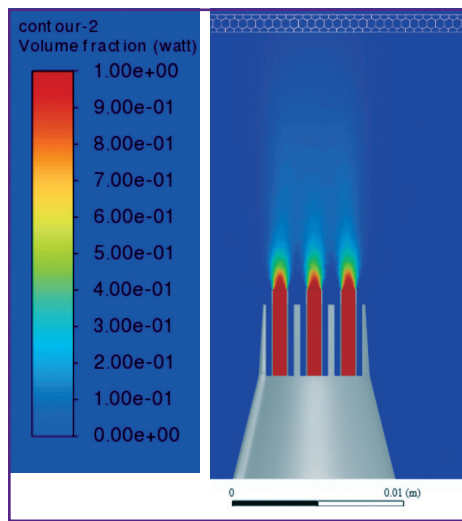


Рис. 10. Распределение объемной доли жидкости при  $L=15$  мм

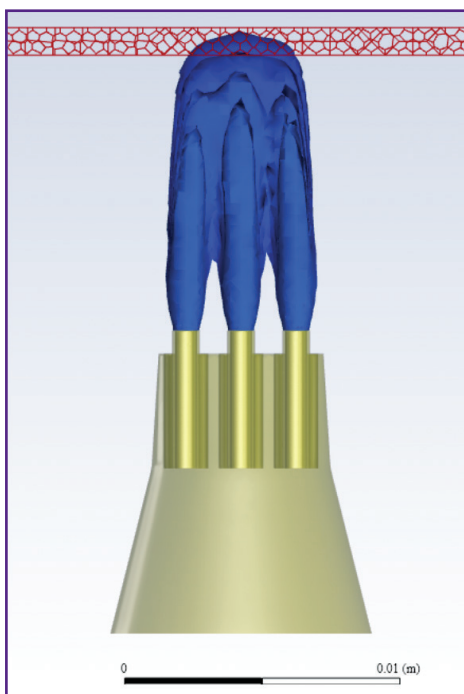


Рис. 9. Распределение изоповерхностей объемной доли жидкости в диапазоне 5–7% при  $L=10$  мм

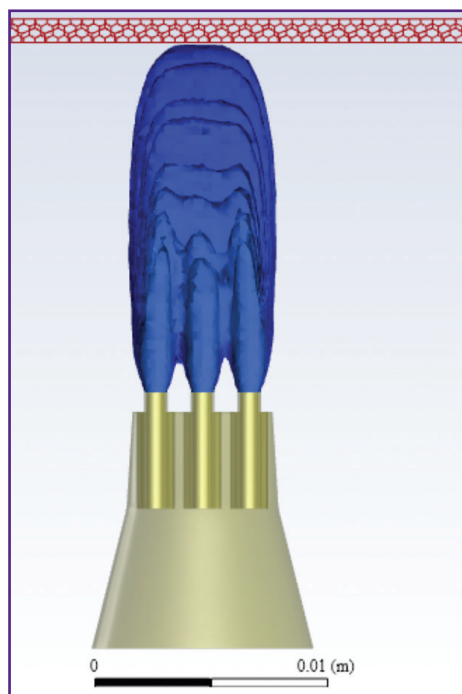


Рис. 11. Распределение изоповерхностей объемной доли жидкости в диапазоне 2–5% при  $L=15$  мм

поверхности десны, попадая вовнутрь на расстояние до 0,2 мм, фактически не оказывая на десну никакого влияния, как это отображено на рис. 11.

Таким образом, разработанная математическая модель взаимодействия жидкостно-воздушной смеси с тканями пародонта при использовании метода барофореза в клинической практике пародонтологии свидетельствует об эффективности его применения для доставки лекарственных средств в десну. Оптимальным расстоянием от насадки до поверхности десны можно считать 10–15 мм. Такое расстояние безопасно для пациента и позволяет доставить лекарственный препарат на глубину до 0,45 мм.

## Заключение

Результаты численного моделирования при решении задачи поиска оптимального расстояния от насадки до поверхности десны при проведении барофореза с использованием комплексного подхода, включающего в себя численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, показали, что допущения и коэффициенты, принятые в процессе постановки задачи и ее решения, обеспечивают физичность результатов и свидетельствуют о возможности использования барофореза в медицинской практике.

**Финансирование исследования и конфликт интересов.** Работа не финансировалась никакими ис-

точниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

## Литература/References

1. Wei Y., Deng Y., Ma S., Ran M., Jia Y., Meng J., Han F., Gou J., Yin T., He H., Wang Y., Zhang Y., Tang X. Local drug delivery systems as therapeutic strategies against periodontitis: a systematic review. *J Control Release* 2021; 333: 269–282, <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.03.041>.
2. Ahn D.H., Kang I. Transdermal delivery of a new hair growth promoting solution in patients with hair loss. *Int J Case Rep Images* 2019; 10: 101016Z01DA2019, <https://doi.org/10.5348/101016z01da2019cs>.
3. Iannitti T., Palmieri B., Aspiro A., Di Cerbo A. A preliminary study of painless and effective transdermal botulinum toxin A delivery by jet nebulization for treatment of primary hyperhidrosis. *Drug Des Devel Ther* 2014; 8: 931–935, <https://doi.org/10.2147/dddt.s60389>.
4. de Boer R. Highlights in the historical development of the porous media theory: toward a consistent macroscopic theory. *Appl Mech Rev* 1996; 49(4): 201–262, <https://doi.org/10.1115/1.3101926>.
5. Pitz-Paal R., Hoffschmidt B., Böhmer M., Becker M. Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation. *Sol Energy* 1997; 60(3–4): 135–150, [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(97\)00007-8](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(97)00007-8).
6. Hsu C.T. Dynamic modeling of convective heat transfer in porous media. In: *Handbook of porous media*. Vafai K. (editor). Boca Raton, Florida: CRC Press; 2005; p. 39–80, <https://doi.org/10.1201/9780415876384.ch2>.