

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2017.4.02  
УДК 531/534: [57+61]



**Российский  
Журнал  
Биомеханики**  
www.biomech.ru

## **БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КАРИЕС-ИНФИЛЬТРАЦИИ ФОТОПОЛИМЕРА В ЗУБНУЮ ЭМАЛЬ**

**Р.И. Изюмов<sup>1</sup>, А.Л. Свистков<sup>1</sup>, О.С. Гилева<sup>2</sup>, М.А. Шакуля<sup>2</sup>, А.Д. Левицкая<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Лаборатория микромеханики структурно-неоднородных сред Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614013, Пермь, ул. акад. Королева, 1, e-mail: izumov@icmm.ru

<sup>2</sup> Кафедра пропедевтики и физиотерапии стоматологических заболеваний Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера, Россия, 614000, Пермь, ул. Куйбышева, 39, e-mail: rav.m2204@gmail.com

**Аннотация.** Исследование направлено на определение эффективности лечения кариеса зубов человека методом инфильтрации в эмаль светоотверждаемого полимера. Процедура кариес-инфильтрации является перспективной технологией лечения начального кариеса. В результате насыщения эмали полимером прекращается развитие болезни. За счет того, что источник деминерализации можно заблокировать еще на этапе зарождения кариеса, появляется возможность прервать развитие процесса на стадии, когда еще можно сохранить целостность зуба и при этом обойтись без механического повреждения эмали и нарушения естественной структуры зуба в целом. В данной работе с помощью математического моделирования и применения пакета программ конечно-элементного анализа исследование инфильтрационного метода лечения кариеса было проведено с позиции капиллярных явлений на основе решения задачи о диффузии химически реагирующей смеси в системе «ротовая полость – зуб – организм», позволившей определить поврежденность структуры твердых тканей в очаге деминерализации. Качественная и количественная оценка необходимых параметров, имеющих функциональную взаимозависимость, была осуществлена с помощью численных экспериментов на тестовых моделях. Дополнительное исследование позволило подобрать параметры, при которых наблюдались наибольшая физичность картины инфильтрации и качественное соответствие реальному процессу. Некоторые свойства инфильтрата были получены экспериментально. Результаты расчетов, проведенных на основе построенной модели, отражают картину процесса инфильтрации фотополимера в зависимости как от свойств инфильтрата, так и от характера объемного распределения кариозной поврежденности в пористой структуре эмали. На практике это позволяет определить время, необходимое для инфильтрации зоны, полностью охватывающей очаг деминерализации, что является критерием при оценке эффективности процедуры лечения инфильтрационным методом.

**Ключевые слова:** моделирование кариес-инфильтрации, структура эмали зубов, капиллярные эффекты, очаг деминерализации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время кариес зубов – одно из самых распространенных заболеваний на планете [4, 8, 13, 15, 21]. В 2003 г. около 5 из 6 млрд человек его имели

---

© Изюмов Р.И., Свистков А.Л., Гилева О.С., Шакуля М.А., Левицкая А.Д., 2017

Изюмов Роман Игоревич, м.н.с. лаборатории, Пермь

Свистков Александр Львович, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Пермь

Гилева Ольга Сергеевна, д.м.н., профессор, заведующая кафедрой, Пермь

Шакуля Мария Александровна, к.м.н., ассистент кафедры, Пермь

Левицкая Анна Дмитриевна, ассистент кафедры, Пермь

(по данным Всемирной организации здравоохранения). В России с 2003 по 2012 г. доля трудоспособной части населения, пораженной кариесом, увеличилась с 90 до почти 100%. По прогнозу Всемирной организации здравоохранения, полное решение проблемы в будущем не предвидится – допускается лишь снижение распространенности кариеса. Как давно заболевание твердых тканей зубов стало настолько обыденным, повсеместным и неустрашимым явлением в жизни нашего общества?

Древнейшие задокументированные упоминания о зубных болезнях встречаются в трудах врачей античности (Гиппократ, Гален, Цельс), в письменных источниках времен Древнего Египта, Греции и Рима, в археологических исследованиях [17, 18, 20, 23, 25, 26, 30]. Первые проявления заболевания уже в период неолита и палеолита связывают с таким эпохообразующим этапом прогресса человечества, как возникновение культуры земледелия [19, 29] и, как следствие изменением образа жизни и диеты. Этому есть подтверждения и в эпоху Нового времени, и в современности, когда происходит контакт примитивных изолированных народов с цивилизацией [33]. Сложно назвать причины, по которым естественный механизм защиты от кариеса не смог сформироваться эволюционным путем. Предположительно, препятствием стало ослабление фактора естественного отбора в условиях ускоренного развития технологической стороны человеческой цивилизации.

На сегодняшний день накоплена масса знаний о сути и причинах заболевания, в достаточной степени развиты технологии диагностики, мониторинга, лечения и предотвращения кариеса, однако проблема остается и, более того, усугубляется. Следовательно, одно только обладание знанием и технологией, очевидно, является недостаточным условием для решения задачи искоренения кариеса. Ее глобальность и многогранность требуют применения как минимум подходов различных областей науки, что позволит по-новому взглянуть на это явление и исследовать его более эффективно. В связи с этим можно с оптимизмом отметить, что для развития медицины, в том числе стоматологии, в настоящее время характерно ее тесное взаимодействие с другими дисциплинами (биомеханикой, химией, физикой, информатикой, математикой). Примером могут послужить многочисленные работы, в которых зубочелюстная система в контексте различных патологий рассматривается как объект биомеханического моделирования [3, 5, 10–12, 16].

В данной работе представлено исследование эффективности микроинвазивного метода лечения кариеса зубов методом инfiltrации [9]. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению данной тематики [7, 22, 27, 28, 31, 32], способ их проведения *in vitro* подразумевает достаточно грубые допущения, связанные с нарушением целостности системы «ротовая полость – зуб – организм». По мнению авторов, исследование процессов, связанных с развитием заболевания и его лечением, с помощью построения математических моделей, учитывающих взаимоотношения зуба в системе, является и актуальным, и в то же время эффективным методом исследования.

Изучение процедуры инfiltrации с помощью моделирования дает возможность обойтись без сложных экспериментов, которые бы требовали проведения имитации воздействия на зуб всех составляющих живой системы «ротовая полость – зуб – организм». Но при этом моделирование позволяет рассмотреть влияние различных условий на эффективность лечения: с учетом разных стадий развития кариеса, небольших отклонений и грубых нарушений правил проведения процедуры, при подборе необходимых параметров инfiltrата. В качестве критерия эффективности процедуры лечения было принято выполнение условия полной инfiltrации очага деминерализации за приемлемое время (до 5 минут).

## ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ИНФИЛЬТРАЦИИ

Модель, описывающая процесс инфильтрации эмали композитным материалом в зоне очага деминерализации, была построена в среде программного комплекса конечно-элементного анализа. Поставленная задача решалась с позиции теории частично насыщенного потока в пористых средах. В программе заложен закон Форхгеймера (1), устанавливающий связь между вектором скорости фильтрации и полем давления, вызывающего течение:

$$\mathbf{f}(1 + \beta\sqrt{\mathbf{v}_w \cdot \mathbf{v}_w}) = -c \frac{k_s}{\gamma_w} \mathbf{k} \left( \frac{\partial u_w}{\partial \mathbf{x}} - \rho_w \mathbf{g} \right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{f}$  – скорость объёмного потока,  $\mathbf{f} = sn\mathbf{v}_w$ ;  $s$  – насыщенность ( $0,01 < s < 1$ ),  $s = dV_w/dV_v$ ;  $n$  – пористость,  $n = dV_v/dV$ ;  $dV_w$  – объём жидкости;  $dV_v$  – объём пустот;  $dV$  – полный объём;  $\mathbf{v}_w$  – скорость потока;  $\beta$  – «коэффициент скорости»;  $k_s(s)$  – зависимость проницаемости от насыщенности ( $k_s = 1$  при  $s = 1$ );  $\rho_w$  – плотность жидкости,  $\rho_w = \gamma_w/g$ ;  $\gamma_w$  – удельный вес жидкости;  $g$  – гравитационная постоянная;  $\mathbf{k}(n, \theta, f_\beta)$  – проницаемость полностью насыщенной среды;  $u_w$  – давление смачивающей жидкости в порах;  $c$  – константа.

В общем случае параметр  $\mathbf{k}$  может иметь зависимость от пористости (по умолчанию задается кубическая зависимость  $k_s(s) = s^3$ , что определяет модель проницаемости в частично насыщаемой среде), температуры и других переменных. В нашей постановке считаем параметр  $\mathbf{k}$  зависящим только от пористости,  $\mathbf{k} = k_n(n)$  (это предполагает использование модели проницаемости в насыщаемой среде). Не рассматривались влияние силы тяжести и большие скорости ( $\mathbf{g} = 0, \beta = 0$ ). Зависимости давления  $u$  от насыщенности  $s$ , определяющие капиллярные явления в пористой среде, были заданы таблично. После принятия представленных допущений формула (1) принимает вид

$$\mathbf{f} = -c \frac{k_s k_n}{\gamma} \left( \frac{\partial u_s}{\partial \mathbf{x}} \right), \quad (2)$$

где неизвестными параметрами, которые необходимо установить для построения модели, являются:  $c$  – константа, характеризующая процесс инфильтрации количественно;  $n$  – структурный параметр, определяющий распределение пористости в очаге деминерализации;  $k_n, k_s$  – параметры, определяющие зависимости проницаемости эмали от пористости и от насыщенности;  $u_s$  – параметр, определяющий зависимость давления в порах эмали от насыщенности.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

1) Для установления структурного параметра  $n$  пористой среды были использованы и адаптированы основные результаты предыдущих работ авторов [14, 24].

2) Для качественной оценки параметров  $k_n, k_s, u_s$  были рассмотрены тестовые модели инфильтрации.

3) Для количественной оценки параметра  $c$  было использовано аналитическое решение задачи о течении жидкости в микроканале с учетом капиллярных эффектов, что, в свою очередь, потребовало проведения экспериментов по определению свойств *Icop*: вязкости, угла смачивания полимером *Icop* находящейся в различных условиях зубной эмали.

### Расчет пористости ( $n$ ) эмали в очаге деминерализации

В работах [14, 24] были получены количественные характеристики поврежденности каналов эмали в области развития очага деминерализации, которые описываются функцией  $r(t, h)$ , устанавливающей зависимость радиуса эмалевых каналов от глубины ( $h$ ) и продолжительности ( $t$ ) процесса деминерализации. Для построения модели инfiltrации необходимо преобразовать полученные результаты решения одномерной задачи на случай объемной постановки  $r(\rho, \varphi, h)$ , а затем рассчитать распределение пористости ( $S$ ) в теле очага деминерализации. Для этого были учтены некоторые особенности зарождения и развития кариеса, а также строения эмали.

Как известно, в результате недостаточного внимания к гигиене полости рта на поверхности зубов в органических отложениях могут появляться скопления бактерий, впоследствии образующие так называемую зубную бляшку, жизнедеятельность которой становится источником агрессивного воздействия на эмаль, приводящего к заболеванию. Начальным этапом зарождения зубной бляшки является прикрепление определенных видов бактерий к поверхности зуба, которое происходит в наиболее благоприятных для их жизнедеятельности местах. Выбор такого благоприятного участка есть момент локализации будущей патогенной бляшки, а локализация очага деминерализации является следствием.

Таким образом, зубная бляшка, которая рассматривается как источник кислоты, в некоторый начальный момент времени образуется на некотором малом участке поверхности и увеличивается в радиальном направлении по мере поддержания приемлемых для нее условий. При этом делаем допущение, что скорость роста бляшки постоянна. Это значит, что на любом удалении от центра очага происходят одни и те же процессы деминерализации (рассмотрены в работах авторов [14, 24]), но с некоторым запаздыванием, которое зависит от характера процесса деминерализации. Для ясности рассмотрим (рис. 1) очаг деминерализации перед процедурой инfiltrации (т.е. после удаления бляшки). Будем считать, что на данном этапе воздействие бляшки на эмаль прекратилось, поэтому назовем этот момент времени  $t_{end}$ . Размер (радиус) образованного за это время очага равен  $\rho_{end}$ .

На границе очага, т.е. на удалении  $\rho = \rho_{end}$  от центра, процессы деминерализации не успели начаться, что соответствует начальному состоянию эмали, которое определяется значением функции  $r(t, h)$  при  $t = 0$ . Однако чем ближе к центру, тем сильнее проявляются деструктивные процессы, и в самом центре ( $\rho = 0$ ), где бляшка воздействовала на эмаль в течение всего периода своего существования от зарождения ( $t = 0$ ) до удаления ( $t = t_{end}$ ), состояние эмали определяется значением функции  $r(t, h)$  при  $t = t_{end}$ . Эти рассуждения позволяют перестроить функцию  $r(t, h)$  в цилиндрической

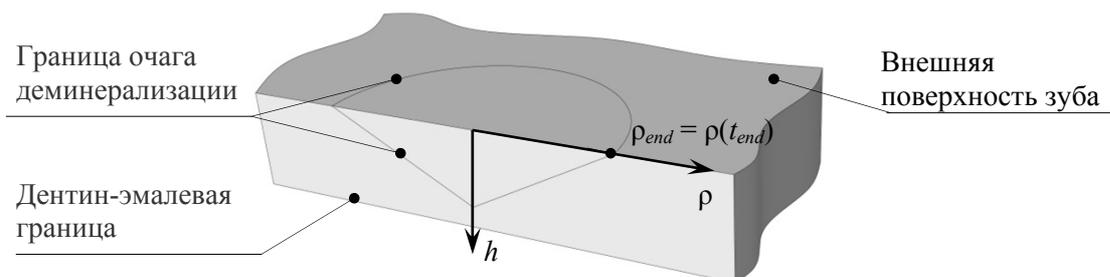


Рис. 1. Схематичное представление слоя эмали в разрезе, проходящем через ось симметрии очага деминерализации:  $\rho_{end}$  – размер очага на поверхности зуба в рассматриваемый момент времени  $t_{end}$

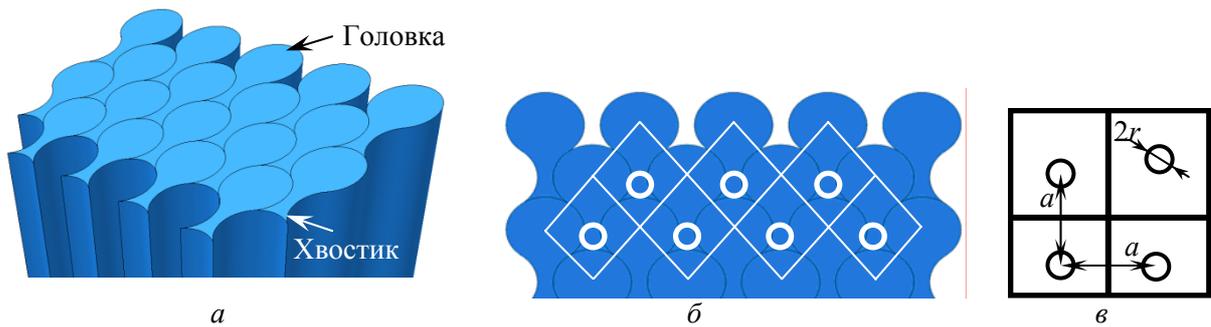


Рис. 2. Структурные единицы эмали (эмалевые призмы), имеющие в сечении форму замочной скважины (а); периодическое распределение участков призм, в которых образуются каналы (обозначены кругами) (б); схема распределения каналов (в)



Рис. 3. Распределение пористости в очаге деминерализации (а); фотография подповерхностного кариеса (б)

системе координат  $r(\rho, \varphi, h)$ . Для этого каждому моменту времени  $t$  соответствует расстояние от центра бляшки  $\rho$ , которое рассчитывается по формуле  $\rho = \rho_{end} - t \cdot \rho_{end}/t_{end}$ . Также учтем осесимметричный характер роста очага деминерализации:  $r(\rho, \varphi, h) \rightarrow r(\rho, h)$ . Таким образом, было получено распределение значений радиуса канала от центра до края очага деминерализации и в глубину эмали.

Для расчета пористости  $S(\rho, h)$  необходимо знать как радиус каналов [1, 6], так и схему их расположения. Основную структурную составляющую эмали принято рассматривать в виде призмы (рис. 2, а), основание которой имеет форму замочной скважины [2]. Выделяют головную и хвостовую части основания эмалевой призмы. Хвостовая часть образована межпризменным веществом, которое в процессе деминерализации разрушается, открывая направленные вглубь эмали каналы.

Для упрощения расчета пористости на схеме расположения каналов была выделена ячейка периодичности (см. рис. 2, б) в виде квадрата со стороной  $a$ , равной расстоянию между каналами с радиусом  $r$  (см. рис. 2, в). Распределение пористости рассчитываем как  $S(\rho, h) = \pi \cdot r^2(\rho, h)/a^2$ , где  $a = 10 \cdot r(0,0)$ . Параметр  $a$  был подобран таким образом, чтобы расчет пористости по данной схеме давал в начальный момент времени значения, приблизительно равные значению пористости поверхностного слоя эмали (3–5%) [1]. На рис. 3 дано сравнение визуализации распределения пористости, рассчитанной по предложенной схеме, и фотографии реального очага деминерализации, которые согласуются не только качественно по форме и расположению, но и количественно – по структуре.

### Оценка параметров $k_n$ , $k_s$ , $u_s$ численными экспериментами на основе анализа характера фронта инфильтрации

Для оценки неизвестных параметров  $k_n(n)$ ,  $k_s(s)$ ,  $u_s(s)$  были рассмотрены несколько их комбинаций на тестовых моделях (рис. 4). Критерием отбора параметров было качественное соответствие результатов численного моделирования реальной картине протекания процесса инфильтрации. Было определено незначительное влияние параметра  $k_n$  на процесс, что можно объяснить малым диапазоном значений пористости. Параметры  $k_s$  и  $u_s$  были найдены такими, которые бы давали сохранение резкой выраженности фронта на протяжении всего процесса инфильтрации, а также сохранение начально заданного значения насыщенности в той области материала, которой фронт инфильтрации еще не достиг (см. рис. 4, б). Дополнительно по результатам анализа продвижения инфильтрата в пористый материал путем аппроксимации положения фронта  $h(t)$  в процессе инфильтрации степенной функцией вида  $h(t) = a \cdot t^b$ , где  $a$  и  $b$  – варьируемые константы, было установлено, что параметр  $k_s$  значительно влияет на характер продвижения фронта (см. рис. 4, в).

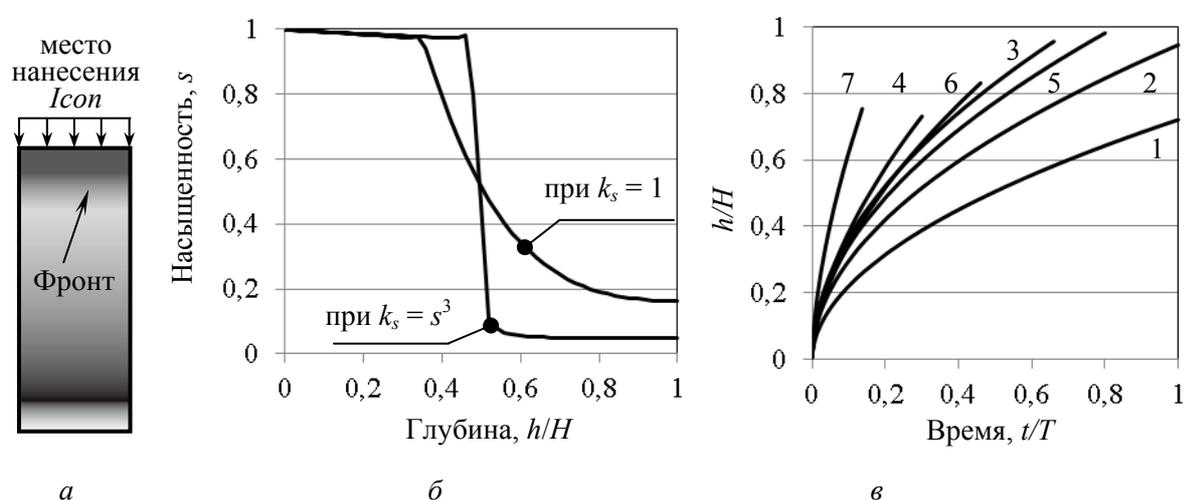


Рис. 4. Тестовая модель инфильтрации,  $n = \text{const}$  (а); влияние параметра  $k_s$  на профиль насыщенности эмали (б): при  $k_s = s^3$  – резко выраженный фронт инфильтрации, при  $k_s = 1$  – размытие фронта; продвижение фронта вглубь эмали в процессе инфильтрации (в): при  $k_s = s^3$  (кривые 1, 2, 3, 5) –  $h(t) \sim t^{0,5}$ , при  $k_s = 1$  (кривые 4, 6, 7) –  $h(t) \sim t^{0,6}$ .  $H$  – глубина очага деминерализации;  $T$  – характерное время инфильтрации эмали на глубину  $H$

Итогом тестирования стало определение характера неизвестных параметров, которые бы давали наиболее правдоподобное объяснение поведения инфильтрата, согласующегося с известными в клинической практике фактами.

### Определение параметра $s$ с помощью решения задачи о течении в капилляре на основе характера продвижения фронта инфильтрации

Для количественной оценки характера продвижения фронта процесс проникновения композитного материала в каналы эмали был рассмотрен с позиции капиллярных эффектов. Вычисление характерного времени инфильтрации эмали заданной глубины дает возможность провести оценку константы, отвечающей за скорость протекания инфильтрации. Время заполнения пор интактной эмали определяется по формуле, полученной на основе выкладок работы [14]:

$$T_0 = \frac{2H^2\eta}{\sigma_{12} \cos\theta R_{\text{const}}}, \quad (3)$$

где  $T_0$  – время заполнения цилиндрического канала (без учета изменения его формы под действием деминерализации) на глубину  $H$ ;  $\eta$  – вязкость инфильтрата;  $\sigma_{12}$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  – угол смачивания;  $R_{\text{const}}$  – радиус канала.

С помощью формулы (3) можно оценить процесс проникновения инфильтрата как  $h(t) \sim t^{0,5}$ , что в значительной мере (расхождения менее 1%) совпадает с результатами численного моделирования, проводимого с параметром  $k_s = s^3$ . Для учета криволинейности стенок микроканалов в очаге, возникшей в результате воздействия на них процессов деминерализации, также используются выкладки [14]:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{2R_{\text{const}}}{H^2} \int_0^H \frac{h\sqrt{1+(R'(h))^2}}{R(h)} dh, \quad (4)$$

где  $R(h)$  – функция зависимости радиуса канала от расстояния от поверхности эмали.

Необходимо определить параметры  $\sigma_{12}$ ,  $\eta$ ,  $\theta$ . Энергия поверхностного натяжения многих жидкостей имеет приблизительно один порядок (примем  $\sigma_{12} = \sigma_{12}^{\text{воды}} = 70$  мН/м). Параметр  $\eta$  (вязкость) был определен экспериментально (реометр *MCR501*, квазистационарный режим, погрешность 3%) для диапазона температур от 30 до 40 °С. Получена линейная зависимость от температуры с минимумом  $\eta = 6,6$  мПа·с при 40 °С и максимумом  $\eta = 9,25$  мПа·с при 30 °С. Допустим, что инфильтрат после нанесения нагревается до нормальной температуры тела 36,6 °С, и примем для расчетов значение вязкости  $\eta = 7,3$  мПа·с.

Параметр  $\theta$  (угол смачивания) зависит от энергетических характеристик трех контактирующих сред. Две из них определены (зубная эмаль и полимер *Icon*), а третья может варьироваться в зависимости от того, какой химической обработке был подвергнут зуб.

В качестве контактирующих с зубом и полимером *Icon* сред были рассмотрены воздух, вода, этиловый спирт и водные растворы этилового спирта с различными пропорциями вода – спирт. Такой выбор объясняется тем, что в процессе подготовки эмали к инфильтрации после травления и промывки водой также обязательно выполняются просушка воздухом и процедура *Icon-Dry*, которая подразумевает нанесение на поверхность зуба этанолсодержащего геля. Соответственно, представляет интерес рассмотреть такие гипотетические ситуации, при которых эмалевые каналы могут оказаться либо полностью просушены, либо полностью насыщены жидкостью (водой, этанолом или его водным раствором).

Таким образом, целью данной части работы является экспериментальное исследование величины угла смачивания полимера *Icon* на поверхности зубной эмали в различных средах (воздух, вода, этиловый спирт и водные растворы этилового спирта) и определение условий, при которых инфильтрация *Icon* в эмаль зуба возможна и наиболее эффективна.

Для достижения поставленной цели было необходимо экспериментально воспроизвести условия, в которых может находиться эмаль при соблюдении требований к подготовке зуба перед инфильтрацией по технологии *Icon* (продолжительность и последовательность процедур промывки, просушки воздухом и спиртом, травления) и при возможных отклонениях от данных требований.

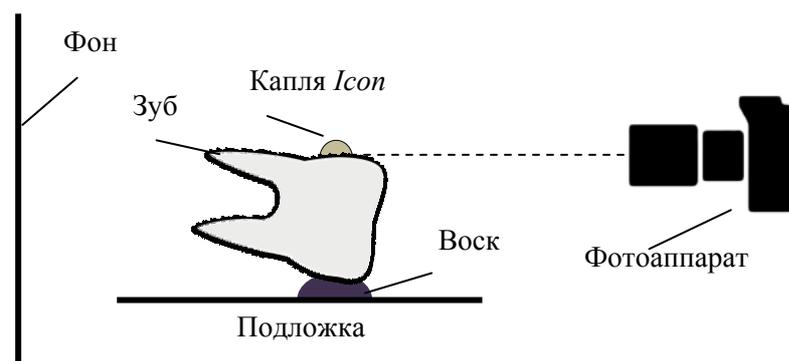


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для определения угла смачивания

Образцы зубов, а также необходимые для проведения эксперимента материалы (гель для травления *Icon-Etch*, этанолсодержащий гель *Icon-Dry*, инфильтрат *Icon*) были предоставлены сотрудниками Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера, г. Пермь.

Использовалась стандартная методика проведения эксперимента по определению угла смачивания.

Перед экспериментом каждый зуб проходил подготовку по методике *Icon*, включающую в себя следующие этапы: мягкая очистка зуба, протравка с помощью *Icon-Etch* в течение 2 минут, промывка водой в течение 30 секунд, просушка воздухом, обработка с помощью геля *Icon-Dry* в течение 30 секунд, просушка воздухом.

Для проведения эксперимента в воздушной среде каждый зуб фиксировался на стеклянной подложке (рис. 5) с помощью воска таким образом, чтобы его достаточно крупный плоский участок располагался горизонтально. Зуб с подложкой устанавливался перед ровно освещенным фоном, после чего на поверхность эмали помещалась капля полимера *Icon*.

Съемка капли проводилась в одной плоскости с верхней горизонтальной поверхностью зуба. Калибровку изображения с помощью эталона длины не делали, поскольку результат обработки данных эксперимента (угол смачивания) является безразмерным и определяется только соотношением размеров капли.

Дополнительно для проведения эксперимента в жидкой среде перед нанесением капли зуб на подложке помещался в стеклянную кювету с плоскими стенками. Были проведены две серии экспериментов: в одной серии капля фотополимера *Icon* наносилась на несколько образцов зубов в воде и этаноле, в другой исследовалась кинетика угла смачивания *Icon* в зависимости от содержания этанола в воде. Форма капли регистрировалась в растворе воды с процентным по объему содержанием этанола: 1%, 6%, 11%, 20%, 30% и 35%. Изменение пропорций проводилось без изъятия образца из раствора.

Для определения угла смачивания использовалась стандартная методика расчетов. Были определены диаметр ( $d$ ) и высота ( $h$ ) капли в пикселях. Вычисление угла смачивания производилось по формуле

$$\theta = \arccos \left( \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2} \right). \quad (5)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. В воздушной среде были исследованы 24 зуба. При попадании капли полимера на поверхность зуба начинался ускоряющийся процесс ее растекания, который длился не более трех секунд, после чего каплю на поверхности было невозможно визуально выделить. Угол смачивания *Icon* в воздушной среде установить не удастся – капля не стабильна,  $\theta_{\text{в воздухе}} \rightarrow 0^\circ$  (рис. 6).

2. В водной среде были исследованы шесть образцов (рис. 7). В этих условиях капля стабилизировалась почти мгновенно. Угол смачивания составил  $\theta_{\text{в воде}} = 106 \pm 0,5^\circ$ .

3. Исследование зависимости угла смачивания полимера от пропорций компонент в водном растворе этанола было проведено на одном образце зуба. Содержание этанола ограничили величиной 35%. Это обусловлено тем, что дальнейшее его увеличение приводило к уменьшению высоты капли до степени, не позволяющей четко зафиксировать форму *Icon*. При нанесении капли в растворе с 95%-ным содержанием этанола ее форма не стабилизировалась, как и в случае с нанесением в воздушной среде,  $\theta_{\text{в этаноле}} \rightarrow 0^\circ$ . Было отмечено скоротечное стекание полимера с поверхности зуба на подложку. С помощью экстраполяции экспериментальных данных (рис. 8) было показано, что можно ожидать резкого падения величины угла смачивания *Icon* до нулевого значения при содержании этанола в растворе, равном 46%.

Исследования влияния этанола на угол смачивания эмали полимером *Icon* показали (рис. 9), что даже малое содержание этанола в воде позволяет полимеру проникать вглубь эмали за приемлемый промежуток времени.

По формуле (3) характерное время проникновения *Icon* в эмаль на глубину 1 мм при содержании в воде этанола 1% составляет 3 секунды. При этом, основываясь на экстраполяции данных, можно показать, что небольшое уменьшение содержания этанола с 1% до ~0,77% приближает угол смачивания к  $90^\circ$  и увеличивает время инфильтрации ( $t \rightarrow \infty$ ) до неприемлемых значений.

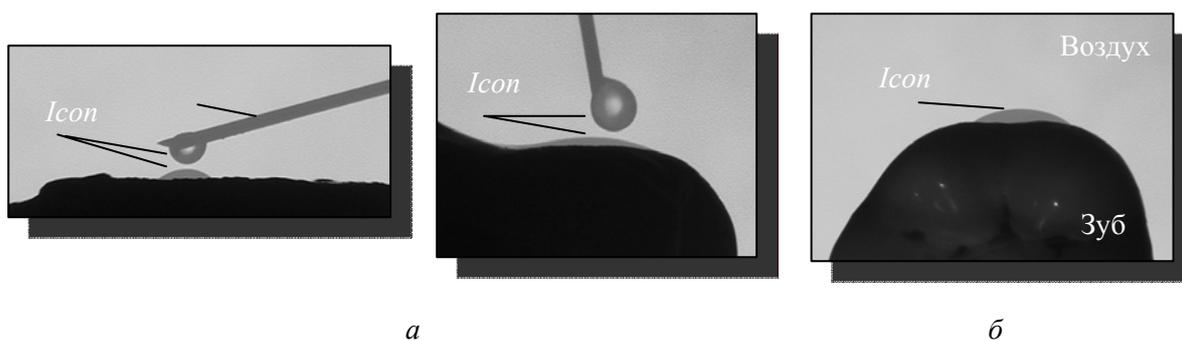


Рис. 6. Фотографии капли *Icon* до (а) и в момент ее касания (б) поверхности зуба

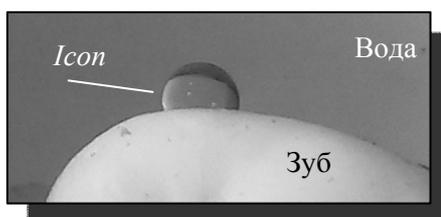


Рис. 7. Форма капли полимера *Icon*, нанесенной в водной среде



Рис. 8. Зависимость угла смачивания *Icon* от содержания этанола в воде. Маркеры – экспериментальные данные, линия – аппроксимация данных

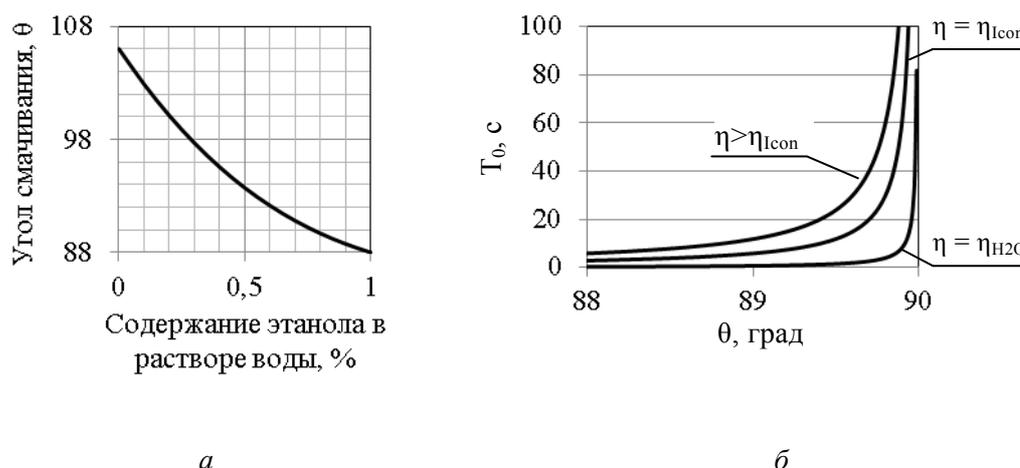


Рис. 9. Зависимость угла смачивания *Icon* от присутствия этанола (аппроксимация данных (а)); продолжительность инфильтрации эмали на глубину 1 мм в зависимости от параметров инфильтрата ( $\eta$ ,  $\theta$ ) (б)

В результате проведенных экспериментов были определены необходимые параметры инфильтрата. На основе полученных данных, а также зная характеристики пористой среды (глубина  $H=10^{-3}$  м, радиус пор  $R_{\text{const}}=2\cdot 10^{-6}$  м), можно, используя формулы (3) и (4), оценить характерное время инфильтрации *Icon* в эмаль (рис. 10, в).

На рис. 10 проиллюстрировано влияние поправки, учитывающей криволинейность эмалевых каналов с помощью формулы (4), для разных стадий кариеса. Содержание этанола принято равным 0,8%, что соответствует углу смачивания 89,7%.

На начальной стадии (0) кариес отсутствует, поправочная функция  $T/T_0$  равна единице, время инфильтрации эмали на глубину 1 мм составило  $T_0 = 20$  с. Стадия (I) – промежуточная. На последней стадии (II) поправочная функция  $T/T_0$  наиболее выражена на небольших глубинах проникновения, однако и на полной глубине  $H = 1$  мм заметно ее влияние. Время инфильтрации составило  $T_{\text{II}} = 16$  с. Учет криволинейности стенок эмалевых каналов дает поправку для времени инфильтрации в 20%.

Для того чтобы полученный результат можно было использовать в качестве характерного времени инфильтрации в конечно-элементной модели, с помощью нее был рассчитан тестовый вариант, поскольку задача течения инфильтрата в капилляре была одномерной, а сопоставить ее требуется с осесимметричной конечно-элементной моделью. В тестовой постановке (рис. 11) отсутствует распределение

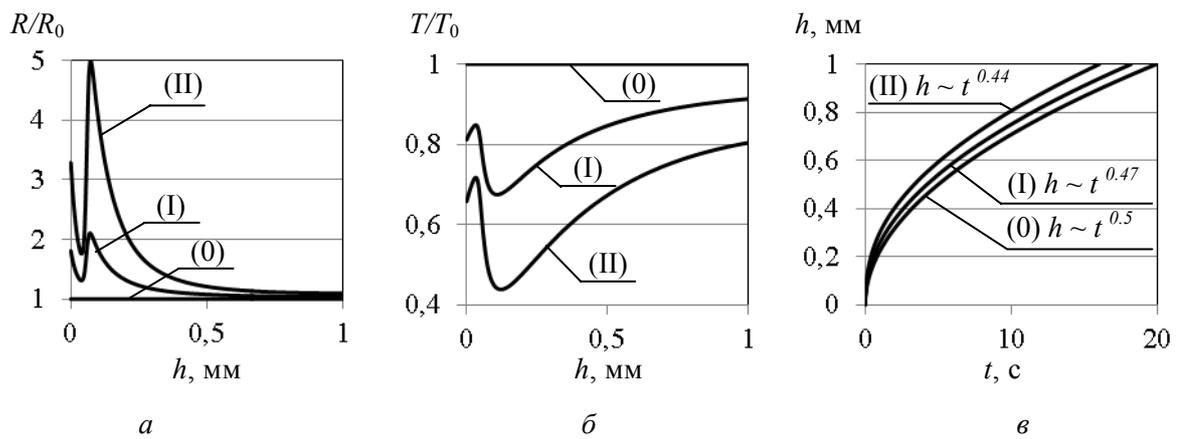


Рис. 10. Относительное изменение радиуса эмалевых каналов на трех стадиях развития кариеса (а); поправочная функция  $T/T_0$  (б); влияние поправочной функции  $T/T_0$  на характер процесса инфильтрации (в)

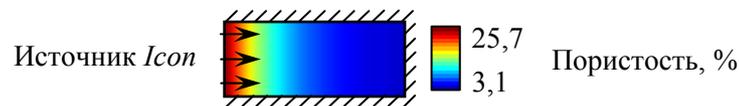


Рис. 11. Тестовая модель инфильтрации с имитацией одномерной постановки

пористости в направлении от оси симметрии, а распределение пористости по глубине определено соответственно функции распределения радиуса канала по глубине, принятой в расчетах по формулам (3) и (4).

Характер продвижения фронта инфильтрации вглубь эмали, определенный по результатам тестовой модели, совпадает с результатами расчетов, представленных на рис. 10, в в виде кривой (II) с зависимостью  $h \sim t^{0.44}$ . Таким образом, мы можем установить реальное время инфильтрации для конечно-элементных моделей с помощью нормировки

$$T = \frac{T_{\text{кЭ}}}{T_{\text{тест}}} \cdot T_{\text{II}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{кЭ}}$  – время инфильтрации, получаемое при моделировании исследуемого варианта;  $T_{\text{кЭ}}^{\text{тест}}$  – время инфильтрации, рассчитанное на тестовой конечно-элементной модели;  $T_{\text{II}}$  – теоретически предсказанное по формуле (3) время инфильтрации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование позволило определить необходимые для построения модели инфильтрации параметры. Полученная модель дает возможность изучить процесс проникновения в эмаль инфильтрата на разных стадиях развития кариеса, для разных размеров (глубины деминерализации) и форм очага деминерализации. Также модель позволяет определить эффективность данной процедуры в случае нарушения условий ее проведения. Для примера рассмотрена следующая задача: исследовать влияние на время инфильтрации способа нанесения полимера *Icon* на поверхность зуба. Были рассмотрены четыре модели, которые отличались размерами ( $r$ ) области нанесения *Icon* (рис. 12).

На рис. 13, *а* проиллюстрированы зависимости глубины инфильтрации от времени. По результатам моделирования можно сделать вывод, что время, необходимое для инфильтрации эмали на глубину 1 мм, обратно пропорционально зависит от размера области нанесения инфильтрата (см. рис. 13, *б*), при том существенно: (I) – 24 с, (II) – 36 с, (III) – 66 с, (IV) – 134 с. Для сравнения на рисунке представлен результат тестовой модели (0) – 16 с.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного конечно-элементного анализа влияния на качественную картину процесса инфильтрации были определены зависимости давление – насыщенность, а также параметры зависимости процесса от пористости и насыщенности материала. Основным критерием отбора параметров было качественное соответствие результатов численного моделирования реальной картине явлений. Дополнительным критерием стало соответствие результатам аналитического решения задачи проникновения инфильтрата в эмаль, механизм которого основывается на действии капиллярных сил. С помощью экспериментов по определению угла смачивания эмали композитом *Ison* в различных средах были установлены условия, при которых проведение процедуры инфильтрации возможно. Полученные из экспериментов данные позволили сделать оценку времени протекания процесса

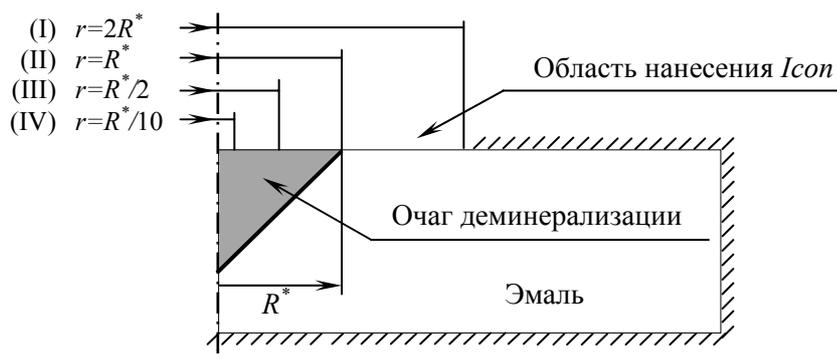


Рис. 12. Четыре варианта нанесения *Ison*. Размер ( $r$ ) области нанесения равен радиусу ( $R$ ) очага деминерализации (II), вдвое больше и меньше (I, III), в 10 раз меньше (IV)

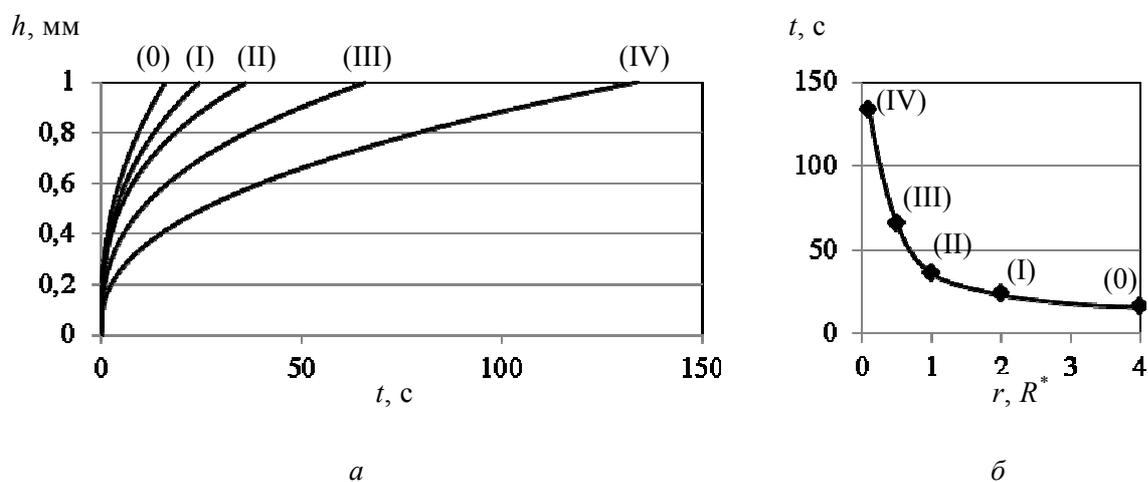


Рис. 13. Процесс проникновения инфильтрата в эмаль в зависимости от способа (I–IV) нанесения *Ison* на поверхность зуба. (0) – Результат тестовой модели (рис. 10)

инфильтрации. Решение задачи позволяет определять эффективность поглощения инфильтрата пористым материалом эмали зуба в различных условиях (в зависимости от характеристик инфильтрата, стадии развития кариеса, размеров и формы очага деминерализации). Расчеты, проведенные на основе предложенной модели, отражают характер течения инфильтрата в зависимости от характеристик инфильтрата и пористой среды. Модель позволяет определить продолжительность инфильтрации зоны, полностью охватывающей очаг деминерализации, что является основным принятым критерием при оценке эффективности процедуры лечения инфильтрационным методом, а также оценить влияние на продолжительность процесса возможных отклонений от требований методики процедуры лечения методом инфильтрации *Ison* (область нанесения *Ison*, качество просушки и степень насыщения эмали этиловым спиртом в ходе подготовки зуба перед инфильтрацией).

В перспективе модель может стать основой для проведения исследований напряженно-деформированного состояния зуба в области проинфильтрованного очага деминерализации, испытывающего остаточные напряжения, вызванные усадкой отвержденного инфильтрата.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-96012-р\_урал\_a, грант №17-48-590562-р\_урал\_a).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровский Е.В. Кариес зубов: препарирование и ломбирование. – М.: Стоматология, 2001. – 144 с.
2. Боровский Е.В., Леонтьев В.К. Биология полости рта. – М.: Медицина, 1991. – 304 с.
3. Босяков С.М., Юркевич К.С. Математическое моделирование начальных перемещений корня зуба в костной ткани под действием мгновенной статической нагрузки // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 3. – С. 27–36.
4. Вавилова Т.П. Биохимия тканей и жидкостей полости рта: учеб. пособие. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 208 с.
5. Гамзаев Б.М., Ибрагимова Л.К. Математическое моделирование в прогнозировании развития кариозного процесса // Пародонтология. – 2007. – № 4. – С. 67–70.
6. Гемонов В.В., Лаврова Э.Н., Фалин Л.И. Развитие и строение органов ротовой полости и зубов: учеб. пособие для студентов стоматологических вузов (факультетов) / Государственное образовательное учреждение Всероссийского учебно-научного медицинского центра Министерства здравоохранения Российской Федерации. – М., 2002. – 256 с.
7. Макеева И.М., Скатова Е.А., Шакарьянц А.А., Макеева М.К. Определение эффективности лечения кариеса методом инфильтрации по результатам исследования *in vitro* // Стоматология. – 2010. – № 4. – С. 39–43.
8. Максимовский Ю.М. Кариес зубов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 80 с.
9. Материал для инфильтрации кариеса [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru.dmgdental.com/products/caries-infiltration/icon> (дата обращения: 23.03.2017).
10. Менар М., Менар О., Рамос А., Лохов В.А., Няшин Ю.И. Описание мышечных и суставных сил при нагружении нижней челюсти. Экспериментальный и вычислительный методы // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 144–157.
11. Никитин В.Н., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Оборин Л.Ф. Реакция височно-нижнечелюстного сустава и усилия жевательных мышц // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 194–207.
12. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Няшин М.Ю., Дубинин А.Л. Область сопротивления зуба: определение и свойства // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 31–38.
13. Персин Л.С., Елизарова В.М., Дьякова С.В. Стоматология детского возраста. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2003. – 639 с.
14. Русаков С.В., Изюмов Р.И., Свистков А.Л., Гилева О.С., Муравьева М.А. Математическое моделирование кариозных процессов, протекающих в зубной эмали, и процесса лечения начального кариеса по технологии *Ison* // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 93–106.

15. Сунцов В.Г., Гарифуллина А.Ж., Самохина В.И. Распространенность основных стоматологических заболеваний у детей города Омска // Современная стоматология. – 2005. – № 1. – С. 62–63.
16. Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н. Биомеханическая модель определения усилий мышц и связок в зубочелюстной системе человека методы // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 8–20.
17. Anderson T. Dental treatment in Medieval England // British Dental Journal. – 2004. – Vol. 197. – P. 419–425.
18. Bernardini F., Tuniz C., Coppa A., Mancini L., Dreossi D., Eichert D., Turco G., Biasotto M., Terrasi F., De Cesare N., Hua Q., Levchenko V. Beeswax as Dental filling on a neolithic human tooth // Public Library of Science. – 2012. – Vol. 7. – P. 1–9.
19. Braidwood R.J., Howe B., Reed C.A. The Iranian Prehistoric Project: new problems arise as more is learned of the first attempts at food production and settled village life // Science. – 1961. – Vol. 133. – P. 2008–2010.
20. Coppa A., Bondioli L., Cucina A., Frayer D.W., Jarrige C., Jarrige J.-F., Quivron G., Rossi M., Vidale M., Macchiarelli R. Early Neolithic tradition of dentistry // Nature. – 2006. – Vol. 440. – P. 755–756.
21. Cummins D. Dental caries: a disease which remains a public health concern in the 21st century—the exploration of a breakthrough technology for caries prevention // The Journal of Clinical Dentistry. – 2013. – Vol. 24. – P. 1–14.
22. Ekstrand K.R., Bakhshandeh A., Martignon S. Treatment of proximal superficial caries lesions on primary molar teeth with resin infiltration and fluoride varnish versus fluoride varnish only: efficacy after 1 year // Caries Research. – 2010. – Vol. 44, № 1. – P. 41–46.
23. Guerini V.A. History of dentistry from the most ancient times until the end of the eighteenth century. – Lea & Febiger, 1909. – P. 355.
24. Izyumov R.I., Rusakov S.V., Zuev A.L., Gileva O.S., Muraveva M.A. Mathematical modeling of caries initiation and progression occurring in dental enamel // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 592–593. – P. 362–365.
25. Kanner L. Folklore of the teeth: history of dentistry. – New York: Macmillan, 1935. – 316 p.
26. Khodadoust K., Ardalan M., Pourabbas R., Abdolrahimi M. Dental and oral diseases in Medieval Persia, lessons from Hedayat Akhawayni // Journal of Medical Ethics and History of Medicine. – 2013. – Vol. 2. – P. 6–9.
27. Kugel G., Arsenault P., Papas A. Treatment modalities for caries management, including a new resin infiltration system // Compendium of Continuing Education Dentistry. – 2009. – № 30. – P. 1–13.
28. Meyer-Lueckel H., Paris S. Progression of artificial enamel caries lesions after infiltration with experimental light curing resins // Caries Research. – 2008. – № 42. – P. 117–124.
29. Oelzea V. Early Neolithic diet and animal husbandry: stable isotope evidence from three Linearbandkeramik (LBK) sites in Central Germany // Journal of Archaeological Science. – 2011. – Vol. 38. – P. 270–279.
30. Oxilia G. Earliest evidence of dental caries manipulation in the Late Upper Palaeolithic // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – P. 1–10.
31. Paris S., Chatzidakis A.J., Meyer-Lueckel H. Influence of application time on caries infiltration in primary teeth // International Journal of Paediatric Dentistry. – 2009. – № 19. – P. 9.
32. Paris S., Meyer-Lueckel H. Masking of labial enamel white spot lesions by resin infiltration—a clinical report // Quintessence International. – 2009. – Vol. 40, № 9. – P. 713–718.
33. Price W.A. Nutrition and physical degeneration. – New York, London: Medical Book Department of Harper & Brothers, 1939.

## **BIOMECHANICAL MODELLING OF THE CARIES-INFILTRATION PROCEDURE OF THE PHOTOPOLYMER INTO THE DENTAL ENAMEL**

**R.I. Izyumov, A.L. Svistkov, O.S. Gileva, M.A. Schakulya, A.D. Levitskaya  
(Perm, Russia)**

The study is devoted to the numerical investigation of the effectiveness of caries treatment by infiltration of the light-activated polymer into the caries-damaged enamel. The procedure of caries-infiltration is an advanced technology for treating of initial caries. As a result of enamel saturation with photopolymer, the progression of the disease stops. Due to the fact that the source of demineralization can be blocked even at the stage of caries

initiation, it is possible to interrupt the caries development without mechanical damage of the enamel and without disruption of the natural structure of the tooth as a whole. In this paper, using the mathematical modelling and the application of the finite element analysis software package, the study of the infiltration method of caries treatment was carried out from the position of capillary phenomena on the basis of solving the problem of diffusion of a chemically reacting mixture in the “oral cavity–tooth–organism” system, which made it possible to determine the damage of solid tissues structure in the center of demineralization. Qualitative and quantitative estimation of the necessary parameters with functional interdependence was carried out with the help of numerical experiments on test models. Additional research allowed to us select the parameters under which the greatest physicality of the infiltration and the qualitative correspondence to the results of real process were observed. Some properties of the infiltrating polymer were obtained experimentally. The results of the calculations based on the constructed model reflect the pattern of the infiltration of the photopolymer as a function of both the polymer properties and the diversity of the volume distribution of carious damage in the porous structure of the enamel. In practice, this allows us to determine the time required for the infiltration of a zone completely encompassing the demineralized area, which is the criterion for evaluating the effectiveness of treatment by infiltration method.

**Key words:** modelling of caries infiltration, demineralization, structure of tooth enamel, capillary effects.

*Получено 30 марта 2017*