

DOI: <https://doi.org/10.33295/1992-576X-2025-5-41>

УДК 616.314.8-089.878-089.12-053.2:615.46(045)

*Кістенюк М. О., Біденко Н. В.**Навчально-науковий інститут стоматології Національного медичного університету імені О. О. Богомольця, м. Київ, Україна*

Ендодонтичне лікування постійних зубів із незавершеним формуванням кореня: сучасний стан проблеми

▷ **Актуальність.** За останні роки з'явилась велика кількість публікацій, спрямованих на зміну підходів до ендодонтичного лікування зубів із несформованими верхівками. Водночас лишається висока потреба в ендодонтичному лікуванні таких зубів через ускладнення карієсу та дентальну травму, що робить це дослідження актуальним.

Мета: вивчити сучасний стан питання стосовно підходів до лікування зубів з незавершеним формуванням коренів та узагальнити основні їхні напрями й перспективи.

Матеріал і методи. Під час виконання роботи використано бібліосемантичний метод, здійснено пошук джерел, присвячених ендодонтичному лікуванню зубів із незавершеним формуванням кореня глибиною 10 років.

Результати. Аналіз сучасного стану вивчення питання ендодонтичного лікування зубів із незавершеним формуванням коренів дозволив виокремити напрями стосовно даного питання, а саме: (1) вдосконалення регенеративних методик, використання тканинної інженерії та різних біоматеріалів, які у перспективі дозволять керувати процесами загоєння і регенерації тканин кореня; (2) продовження дослідження оптичних методів діагностики життєздатності пульпи; (3) віднайдення нових методів виявлення мікроорганізмів у кореновому каналі чи біомаркерів запалення безпосередньо з тканин пульпи або періодонту; (4) розширення можливостей діагностики та планування ендодонтичного лікування за допомогою КРТК та платформ на основі штучного інтелекту та перспектив їхнього подальшого розвитку; (5) пошук оптимальних протоколів хемомеханічної обробки коренових каналів, що дозволило б досягнути максимально ефективної дезінфекції каналу при мінімальному негативному впливі агентів на регенеративний потенціал тканин та максимальному збереженні твердих тканин кореня; (6) отримання вірогідних результатів стосовно клінічного успіху, технічних властивостей та герметичності різних матеріалів на основі біокераміки порівняно з класичним МТА а також технік внесення їх у канал; (7) продовження пошуку оптимальних матеріалів для відновлення цервікальної третини кореня.

Висновки. Ендодонтичне лікування зубів із незавершеним формуванням коренів та некрозом пульпи залишається актуальною проблемою дитячої стоматології, зважаючи на високу потребу такого лікування і нижчу, ніж при лікуванні сформованих зубів, ефективність. Наукові досягнення останніх років значно розширили можливості клініцистів у ендодонтичному лікуванні зубів із незавершеним формуванням коренів та мають великий потенціал до удосконалення протоколів лікування та отримання більш передбачуваних результатів. При цьому основними цілями такого лікування є загоєння запального процесу у перирадикулярних тканинах та продовження функціонування зуба у довготривалому періоді.

Ключові слова: ендодонтичне лікування, регенеративна ендодонтія, незрілі зуби, несформовані корені зубів, апексифікація.

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.uk>



Вступ

Згідно з даними ВОЗ, понад 2 млрд дорослих та 514 млн дітей у світі щороку уражаються карієсом зубів та його ускладненнями [1]. Друге місце

серед захворювань твердих тканин зубів посідають їх травматичні ураження, особливо у дітей та молоді [2]. Одним з основних ускладнень карієсу чи травми є некроз пульпи та/або апікальний періодонтит [3]. Тому саме карієс і дентальна

травма є основними причинами потреби в ендодонтичному лікуванні зубів із незавершеним формуванням коренів.

Внаслідок некрозу пульпа втрачає свої функції, корінь зупиняє розвиток і залишається з несформованою верхівкою, тонкими стінками та неправильним коронково-кореневим співвідношенням, що призводить до погіршення прогнозу виживання такого зуба [4]. Методи ендодонтичного лікування при незавершеному формуванні коренів суттєво відрізняються від ендодонтії сформованих зубів, особливо у випадку некрозу пульпи [5]. Відсоток успіху ендодонтичного лікування у зубах із несформованими верхівками досі залишається нижчим, ніж у зубах із завершеним формуванням кореня [6], оскільки на нього впливає значно більша кількість факторів, як-от анатомічні та фізіологічні особливості коренів, їхня здатність до продовження розвитку, складність діагностики та проведення лікування [5, 6].

Технологічний та науковий прогрес останніх років значно розширили можливості лікарів щодо ендодонтичного лікування зубів із незавершеним формуванням коренів. Особливого розвитку було досягнуто у галузі регенеративної ендодонтії, з'явилося більше наукових праць та клінічних матеріалів про різні методи лікування.

Отже, актуальним є подальше вивчення цієї проблеми, для чого необхідно проаналізувати сучасний стан знань і напрямів досліджень з питання.

Мета дослідження: вивчити сучасний стан питання стосовно підходів до лікування зубів із незавершеним формуванням коренів та узагальнити основні їхні напрями та перспективи.

Матеріал і методи

Під час виконання роботи використано бібліосемантичний метод, здійснено пошук джерел, присвячених ендодонтичному лікуванню зубів із незавершеним формуванням кореня глибиною 10 років.

Результати та обговорення

Минуле десятиліття ознаменувалось низкою досліджень та інновацій в ендодонтії, зокрема в ендодонтичному лікуванні зубів із незавершеним формуванням кореня. Умовно їх можна розділити на декілька груп за такими напрямами:

- вивчення морфо-фізіології пульпи, регенеративний напрям;
- діагностика станів, які потребують ендодонтичного лікування;
- хемомеханічна обробка системи корневих каналів, іригаційні системи;

- obturaція системи корневих каналів;
- забезпечення механічної стійкості твердих тканин зуба та реставрація ендодонтично лікованих незрілих зубів.

Вивчення морфо-фізіології пульпи, регенеративний напрям

Якщо методи апексогенезу та апексифікації при лікуванні постійних зубів із незавершеним формуванням кореня відомі достатньо давно та мають докладно описані протоколи виконання [7], то дослідження інших методів регенеративної ендодонтії активно здійснюється сьогодні та не має настільки потужної доказової бази, попри наявність розроблених алгоритмів і протоколів [8].

За останнє десятиліття з'явилося багато праць, що досліджують біологію та імунологічні реакції пульпи та дентину на інфекційне ураження внаслідок карієсу чи травми [9–12]. Це, своєю чергою, змінило сучасний підхід до ендодонтичного лікування зубів, зокрема з несформованими верхівками, та відкрило нові можливості для його покращення. Так, із розвитком регенеративної ендодонтії ключовими цілями ендодонтичного лікування зуба з несформованою верхівкою, окрім усунення клінічних ознак і симптомів запалення, стали подальше завершення дозрівання кореня та відновлення нейрогенезу [13].

Регенерація тканин пульпарно-дентинного комплексу — це послідовність етапів загоєння, яка включає запальну реакцію, імунну сигналізацію та клітинну взаємодію, що супроводжує відновлення тканин [14]. Основний процес регенерації відбувається за допомогою взаємодії між клітинами пульпи та дентину (одонтобластами, мезенхімальними стовбуровими клітинами, імунними та нейросудинними клітинами) і їхньою хімічною сигналізацією шляхом вивільнення цитокінів, хемокінів та інших розчинних факторів. Окрім цього, для подальшої регенерації необхідні біоактивні каркаси, що імітують позаклітинний матрикс, та потенціал мезенхімальних клітин. Застосування тканинної інженерії та вплив на цих етапах за допомогою різних біоматеріалів дозволяє умовно керувати процесами загоєння і регенерації пульпарно-дентинного комплексу. Виділення та використання мезенхімальних стовбурових клітин зуба у регенеративних методиках ендодонтичного лікування має перспективу для забезпечення повноцінної регенерації пульпарно-дентинного комплексу у майбутньому [14].

Проте слід зазначити, що Американська асоціація ендодонтистів (AAE) та Європейське ендодонтологічне товариство (ESE) ще не ре-

комендували трансплантацію мезенхімальних стовбурових клітин до застосування у клінічній практиці через складні та дорогі технічні вимоги, бюрократичні процеси, а також, що не менш важливо, через недостатню підготовку та навички клініцистів [15, 16].

Різні нейромедіатори по типу оксиду азоту мають значний вплив на запалення та загоєння тканин завдяки своїм антимікробним, ангіогенним, ранозагоювальним та імуномодулювальним властивостям. Відповідно, розробляють різні біоматеріали, що вивільняють оксид азоту і впливають на процес загоєння тканин [14].

Велике значення надають і каркасам, що імітують позаклітинний матрикс пульпи. Такі каркаси повинні бути біосумісними, з біоактивних, антибактеріальних, протизапальних матеріалів з низькою імуногенною відповіддю та високою ефективністю доставляння терапевтичних препаратів. З клінічного погляду, матеріали для каркасів мають бути ін'єкційними, адаптованими, біорозкладними та здатними поступово вивільняти фактори росту. Розробляються різноманітні синтетичні та природні полімерні каркаси. [17, 18].

Також у літературі повідомляється про використання кров'яних згустків, плазми, збагаченої тромбоцитами (PRP), та фібрину, збагаченого тромбоцитами (PRF), як каркасів для відновлення пульпарно-дентинної тканини [19].

Окрім цього, широко вивчаються ендодонтичні гідрогелі. Це комплексні сполуки на основі желатину (GelMA), поліетиленгліколю, фібрину або гіалуронової кислоти, що містять біоактивні сполуки, як-от антибіотики, пептиди, фактори росту або наночастинки, що робить їх біоактивними та такими, що виконують роль каркасу для клітинних компонентів [20, 21]. Варто зазначити, що досі залишається багато обмежень клінічного застосування таких засобів через брак результатів досліджень щодо різних параметрів, які можуть впливати на вивільнення цих біоактивних сполук [22].

Таким чином, розвиток регенеративної ендодонтії на сьогодні здійснюється у напрямках віднайдення засобів, що запускають або стимулюють регенеративний процес, матеріалів для формування каркасів, що імітують позаклітинний матрикс пульпи, а також розробки оптимальних методик здійснення лікування з достатнім рівнем доказовості.

Однак, хоча регенеративні методики лікування мають великий потенціал, їхні клінічні результати та прогнози залишаються непередбачуваними та потребують подальших досліджень [4, 23]. Відсутність стандартизованих протоколів

лікування унеможливорює широке клінічне застосування таких методик [24].

Діагностика станів, які потребують ендодонтичного лікування

Одним із ключових моментів ведення зубів, що потребують ендодонтичного лікування, є діагностика стану пульпи та навколишніх тканин. Правильне встановлення діагнозу дозволяє обрати тактику лікування, що матиме найвищий відсоток успіху. Процес діагностики у дітей і підлітків ускладнюється тим, що клінічні діагностичні тести визначення вітальності пульпи в зубах із несформованими верхівками не є достовірними та мають певні обмеження. Тому удосконалення діагностики є сферою особливого інтересу в ендодонтичному лікуванні зубів із незавершеним формуванням коренів.

Відомо, що термічні та електричні тести оцінюють не кровопостачання пульпи, а її нервову забезпечення. У зубах із незавершеним формуванням кореня такі тести не є точними для встановлення діагнозу. Більш точні результати стосовно життєздатності пульпи може дати оцінка її кровопостачання. До таких методів діагностики відносять лазерну доплерівську флоуметрію, що вимірює кровотік у зубі, чи пульсоксиметрію, що оцінює насичення киснем пульпарного кровотоку [25]. Такі методи діагностики мають в основі оптичні технології [26]. Проте використання таких методів дотепер обмежене лабораторними дослідженнями та не має клінічного застосування.

Крім цього, в літературі описано нові методи виявлення мікроорганізмів у кореневому каналі чи біомаркерів запалення безпосередньо із тканин пульпи або періодонту для встановлення більш точного діагнозу та прогнозування результатів лікування. Так, вивчалось використання з діагностичною метою цитокінів — сигнальних білків запалення [27]. Дані дослідження продемонстрували кореляцію між наявністю конкретних молекул та станами пульпи. Різні огляди та статті виявили підвищені рівні IL-1b, IL-2, IL-6, IL-8, фактору некрозу пухлин альфа (TNF- α), MMP-9 та прозапальних цитокінів [28, 29]. Отримані результати окреслюють перспективу у майбутньому отримати точні клінічні методи діагностики стану пульпи та періапикальних тканин. Проте на сьогодні такі методи залишаються на етапі лабораторних досліджень.

Рентгенологічне обстеження є необхідним етапом діагностики й контролю ендодонтичного лікування. Проте двовимірна рентгенографія, як правило, не дає уявлення про реальну анатомію

несформованих коренів, особливо — їхньої верхівкової ділянки, що є критичним для обрання методу і способу лікування [30, 31]. Використання конусно-променевої комп'ютерної томографії (КПКТ) значно розширило можливості лікарів у візуалізації в процесі діагностики та лікування в ендодонтії. Генерація тривимірних зображень високої роздільної здатності дозволяє усунути проблеми накладання анатомічних структур із мінімальним спотворенням зображення [31–33].

Крім того, діагностичні можливості КПКТ покращуються завдяки останнім розробкам у сфері штучного інтелекту (ШІ), що робить її корисним, а часто й незамінним інструментом в ендодонтії незрілих постійних зубів [34, 35]. Наприклад, використання ШІ дозволяє створювати персональні стратегії лікування періапикальних захворювань відносно стадії розвитку зуба або кількісно оцінити та порівняти зміни об'ємів пульпарного простору зубів після проведеного регенеративного лікування [36]. Активно розробляються платформи на основі ШІ для аналізу зображень КПКТ і панорамної рентгенографії, які вже активно використовуються у клінічній практиці, наприклад Diagnocat (Diagnocat Ltd., San Francisco, CA, USA). Система аналізує зображення й генерує інформацію щодо сегментації зубів, виявлених патологій, створює тривимірні моделі, робить заміри (товщину дентину, розміри уражень та інші параметри). Проте можливості для детальної якісної оцінки ендодонтичного лікування все ще обмежені [37].

Хоча КПКТ має багато переваг, у клінічній практиці необхідно ретельно зважувати її ризики та обмеження при використанні у дітей та осіб молодого віку, дотримуючись принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable) [33]. Очікується, що в майбутньому КПКТ-сканери зі зниженою дозою опромінення стануть звичним явищем у стоматологічній практиці та в поєднанні з програмами на основі ШІ допомагатимуть у діагностиці та плануванні ендодонтичного лікування [37].

Хемомеханічна обробка

системи кореневих каналів, іригаційні системи
Успіх регенеративного ендодонтичного лікування зубів із несформованими верхівками значною мірою залежить від здатності ендодонтиста адекватно дезінфікувати кореневі канали та контролювати інфекцію [39, 40]. Через підвищений ризик перелому тонкі та крихкі стінки кореневих каналів незрілих зубів, як правило, деконтамінуються пасивно. Це досягається за допомогою інтенсивного зрошення біоактивними розчинами та застосування внутрішньоканальних медикаментів [41, 42]. Окрім того, в процесі обробки

важливими є мінімізація цитотоксичності та збереження максимальної кількості тканин і клітин із потенціалом до регенерації [43].

Оптимізація протоколів обробки та дезінфекції каналів коренів із незавершеним формуванням верхівки є складним завданням, оскільки потрібно зберегти максимальну кількість тканин кореня, не пошкодити клітинний пул регенерації, і при цьому досягнути якісної антибактеріальної обробки кореневого каналу. Механічне очищення незрілих постійних зубів з некротичною пульпою має бути мінімізоване, оскільки видалення дентину кореневого каналу може послабити й без того тонку та крихку кореневу стінку та зробити корінь більш схильним до перелому [13]. Тому для видалення інфікованих тканин із кореневого каналу застосовують інструменти з мінімальним механічним впливом на стінку дентину. Серед них Gentlefile Brush (Geosoft), XP Finisher (FKG Dentaire, Switzerland), SAF (ReDentNova, Israel) або звичайний ручний файл стандартної конусності [44].

Згідно з клінічними рекомендаціями Американської асоціації ендодонтистів (AAE) для іригації каналу несформованого кореня рекомендується використання 1,5 % розчину гіпохлориту натрію та 17 % розчину ЕДТА (етилендіамінтетраоцтової кислоти) [15]. Низька концентрація в рекомендаціях ґрунтується на цитотоксичності гіпохлориту натрію щодо стовбурових клітин апікального сосочка, однак до сьогодні залишається недостатньо даних щодо антимікробної ефективності 1,5 % гіпохлориту натрію в інфікованих зубах із несформованими верхівками [45]. За деякими дослідженнями використання гіпохлориту натрію перед кондиціонуванням ЕДТА значно знижувало вивільнення трансформувального фактора росту (TGF)- β 1 (цитокін, що впливає на формування тканин кореневого каналу). Однак вплив гіпохлориту натрію на біологічні властивості інших факторів росту дентинної матриці досліджено недостатньо [46].

Застосування ЕДТА є важливим, оскільки, хоча цей засіб і має низьку антимікробну активність, окрім видалення змазаного шару, він підвищує об'єм вивільнення факторів росту з дентину [46], покращує виживання стовбурових клітин апікального сосочка, а також частково усуває шкідливий вплив гіпохлориту натрію [45]. Кондиціонування дентину ЕДТА сприяло адгезії, міграції та диференціації стовбурових клітин пульпи зуба до або на дентин [46]. Зважаючи на сказане, рекомендується фінальне промивання ЕДТА перед утворенням кров'яного згустку. Проте ЕДТА може мати негативний вплив на дентин кореня через демінералізацію дентинного матриксу [47].

Окрім ЕДТА, хелатуючими агентами можуть виступати лимонна, етидренова, малеїнова кислоти, хітозан. Активно досліджується і порівнюється їх вплив на дентин, фактори росту та антимікробну ефективність [48–50].

Серед іригаційних методик, запропонованих для посилення активності антисептичних розчинів, досліджують іригацію з негативним тиском, пасивну ультразвукову іригацію, звукову активацію, фотодинамічну активацію, активацію інструментами з ротаційним та реципрокним рухом [40, 51, 52]. Проте необхідно враховувати великий ризик екструзії іригаційного розчину під час іригації, тому для ефективної безпечної обробки кореневого каналу рекомендують використовувати іригаційні системи з негативним тиском (EndoVac та інші) [53].

У регенеративній ендодонтичній терапії рекомендується застосування гідроксиду кальцію та потрійної пасти з антибіотиками (міноциклін, ципрофлоксацин, метронідазол) як внутрішньоканальних медикаментів для досягнення якісної антибактеріальної обробки [15]. Відомим є припущення, що тривале лікування гідроксидом кальцію як внутрішньоканальною пов'язкою може збільшити ризик перелому кореня [54], проте дослідження останніх років доводять, що перелом кореня після накладення гідроксиду кальцію може бути більше пов'язаний зі стадією розвитку кореня, ніж із тривалим використанням гідроксиду кальцію [55]. Щодо антибіотиків: хоч у дослідженнях *in vitro* вони продемонстрували хорошу протимікробну активність, залишаються певні обмеження та проблеми: комбінація антибіотиків може збільшувати ризики побічних ефектів, як-от алергічні реакції, зміна кольору зуба, виникнення бактеріальної резистентності [56]. Також більшість досліджень, проведених *in vitro*, не дозволяють об'єктивно оцінити ефективність гідроксиду кальцію та пасти з антибіотиків як антимікробних агентів. Крім того, необхідні дані щодо можливого впливу цих внутрішньоканальних медикаментів на стовбурові клітини та біологічні властивості факторів росту [55]. Позиційна заява ESE щодо використання антибіотиків в ендодонтії припускає, що за відсутності вагомих доказів на підтримку використання антибіотиків у регенеративних ендодонтичних процедурах їх використання слід уникати [57]. Виявлено також, що цитотоксичність гідроксиду кальцію нижча, ніж у пасти з антибіотиків, а також він сприяє вивільненню факторів росту з дентину, тоді як антибіотичні пасти мають негативний вплив на цей процес [58].

На жаль, повноцінно оцінити ефективність різних концентрацій іригаційних розчинів чи

внутрішньоканальних медикаментів неможливо, оскільки більшість звітів про випадки, серії випадків та ретроспективних і проспективних когортних досліджень, що стосуються регенеративних методик, не дотримувалися одного й того ж протоколу дезінфекції [59, 60].

Подальші дослідження даного питання сконцентровані на оптимізації протоколів іригації та обробки корневих каналів з несформованими верхівками для максимально ефективної дезінфекції та кондиціювання дентину кореневого каналу при мінімальному негативному впливі агентів на тканини та клітини дентину та пульпи [61, 62].

Обтурація системи корневих каналів

Серед матеріалів, що використовуються у різних методах ендодонтичного лікування зубів із несформованими верхівками, можна виділити гідроксид кальцію, МТА (мінерал триоксид агрегат) та його наступні покоління (Biodentine та біокерамічні пасти) [63, 64]. Більшість досліджень продемонстрували, що застосування МТА та біокерамічних матеріалів має схожі показники клінічного успіху. Однак біокерамічні матеріали використовують для подолання недоліків МТА (зміна кольору зуба, тривалий час затверднення та складність маніпуляцій), забезпечуючи ефективну герметизацію на верхівці [64–66]. Якісна обтурація МТА та його аналогами передбачає герметичність — щільне прилягання до стінок дентину та відсутність внутрішніх і зовнішніх пор у структурі, що значною мірою залежить від техніки, використаної для внесення матеріалу [67].

Протягом багатьох років досліджувалися різні підходи для покращення якості обтурації МТА: ручна конденсація плагерами чи гутаперчевими, паперовими штифтами, ультразвукова активація (вібрація), конденсація ротаційними ендодонтичними файлами [67, 68]. Якісна обтурація МТА залишається складною через низку факторів, включаючи кваліфікацію оператора, вибір матеріалу, геометрію каналу та техніку застосування [69]. Деякі дослідники доходять висновку, що ручна конденсація МТА є більш прогнозованим методом [70], інші доводять, що використання технік активації зменшує внутрішню пористість МТА та покращує його адаптацію до стінок дентину. Вплив цих методик на біокерамічні матеріали залишається недостатньо вивченим [71].

Оскільки дотепер не визначено ідеальної техніки внесення МТА, зберігається потреба в подальших дослідженнях.

*Забезпечення механічної стійкості
твердих тканин зуба в процесі й після
ендодонтичного лікування*

Однією з основних проблем ендодонтичного лікування зубів із несформованими верхівками є знижена механічна міцність зуба, що часто може призводити до невдач, незважаючи навіть на клінічний успіх. Особливо серйозною ця проблема є у зубах на ранніх стадіях розвитку, які більш схильні до переломів через короткі корені та тонкі стінки дентину, що було показано як у дослідженнях *in vitro*, так і в клінічних. Рівень ризику перелому кореня як ускладнення після ендодонтичного лікування зростає зі зменшенням стадії розвитку кореня [54, 72, 73].

Описи клінічних випадків та інші дослідження дозволяють зробити висновки, що проведення регенеративного ендодонтичного лікування у зубах із несформованими верхівками продовжує розвиток кореня, а збільшення товщини може досягати 70 %. Проте результат є непередбачуваним через індивідуальні параметри кожного клінічного випадку (вік пацієнта, апікальний діаметр та стадія розвитку кореня, клінічний діагноз), а збільшення товщини кореня зазвичай обмежується апікальною та середньою третинами кореня [74, 75]. Верхня (пришийкова) зона кореня майже не потовщується, окрім того, залишається ослабленою через встановлення цементної пробки на рівні цементно-емалевого з'єднання [76]. Водночас цервікальна зона кореня підлягає найбільшому функціональному навантаженню під час функціонування зуба і є схильною до переломів, тому залишається критичним місцем у зубах із несформованими верхівками [77].

Реставрація

ендодонтично лікованих незрілих зубів

Отже, постендодонтичне відновлення та продовження функціонування зуба є особливо важливим етапом у лікуванні, незалежно від обраної стратегії лікування.

Для відновлення цервікальної третини кореневого каналу сьогодні використовують низку матеріалів (цементи на основі МТА, гутаперча, композитні матеріали чи скловолоконні штифти) [78]. Згідно з останніми даними, найкращі результати щодо механічної стабільності відновленого зуба продемонструвала глибоко закріплена адгезивна реставрація в кореневому каналі [79]. Композитні матеріали мають модуль еластичності, подібний до дентину, тому зменшують концентрацію напружень у зубів та забезпечують кращі біомеханічні результа-

ти в ендодонтично лікованих зубах [79]. Також використовують композити, що передбачають одночасне внесення більшої порції, наприклад, композити по типу bulk-fill, що дозволяють проведення полімеризації у глибоких ділянках кореня [80, 81]. Додаткові дослідження *in vitro* продемонстрували, що відновлення таких зубів скловолоконними штифтами значно більше підвищує опір зламу незрілих зубів, ніж використання лише композитів [75].

Проте автори нещодавнього систематичного огляду рекомендують бути обережними в інтерпретації цих результатів через нечіткий або високий ризик упередженості [82]. Крім того, стосовно зубів, які лікувались із застосуванням регенеративних методик, залишається проблема неможливості глибокого розміщення адгезивної реставрації, хоча поверхневе покриття адгезивною реставрацією все ж збільшує стійкість до переломів [83, 84]. Необхідні подальші дослідження для ширшого розкриття даної теми.

Підсумки

Підсумовуючи вищенаведене можна виокремити сучасні напрями стосовно ендодонтичного лікування постійних зубів із незавершеним формуванням кореня і некротизованою пульпою, а саме:

- вдосконалення регенеративних методик, використання тканинної інженерії та різних біоматеріалів, які у перспективі дозволять керувати процесами загоєння і регенерації тканин кореня;
- продовження дослідження оптичних методів діагностики життєздатності пульпи (лазерної доплерівської флоуметрії, пульсоксиметрії тощо);
- віднайдення нових методів виявлення мікроорганізмів у кореневому каналі чи біомаркерів запалення безпосередньо з тканин пульпи або періодонту;
- розширення можливостей діагностики та планування ендодонтичного лікування за допомогою КРТК та платформ на основі штучного інтелекту та перспектив їхнього подальшого розвитку;
- пошук оптимальних протоколів хемомеханічної обробки корневих каналів, що дозволило б досягнути максимально ефективної дезінфекції каналу при мінімальному негативному впливі агентів на регенеративний потенціал тканин та максимальному збереженні твердих тканин кореня;
- отримання вірогідних результатів стосовно клінічного успіху, технічних властивостей та герметичності різних матеріалів на основі біокераміки порівняно з класичним МТА, а також технік їх внесення в канал;

- продовження пошуку оптимальних матеріалів для відновлення цервікальної третини кореня.

Висновки

Ендодонтичне лікування зубів із незавершеним формуванням коренів та некрозом пульпи залишається актуальною проблемою дитячої стоматології, зважаючи на високу потребу такого лікування і нижчу, ніж при лікуванні сформованих зубів, ефективність. Наукові досягнення останніх років значно розширили можливості клініцистів у ендодонтичному лікуванні зубів з незавершеним формуванням коренів та мають

великий потенціал до удосконалення протоколів лікування й отримання більш передбачуваних результатів. При цьому основними цілями такого лікування є загоєння запального процесу у перирадикулярних тканинах та продовження функціонування зуба у довготривалому періоді.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію

Автори ознайомлені з текстом рукопису та надали згоду на його публікацію.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. World Health Organization. (2022). Global Oral Health Status Report: Towards Universal Health Coverage for Oral Health by 2030. World Health Organization. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/364538>.
2. Levin, L., Day, P. F., Hicks, L., O'Connell, A., Fouad, A. F., Bourguignon, C., & Abbott, P. V. (2020). International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: General introduction. *Dent Traumatol*, 36(4), 309–313. DOI: <https://doi.org/10.1111/edt.12574>.
3. Jung, C., Kim, S., Sun, T., Cho, Y.-B., & Song, M. (2019). Pulp-dentin regeneration: Current approaches and challenges. *J Tissue Eng*, 10. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041731418819263>.
4. Alghamdi, F. T., & Alqurashi, A. E. (2020). Regenerative endodontic therapy in the management of immature necrotic permanent dentition: A systematic review. *Scientific World Journal*, 2020, 7954357. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/7954357>.
5. Nuni, E., & Slutzky-Goldberg, I. (2023). Endodontic treatment for young permanent teeth. In A. B. Fuks, M. Moskovitz, & N. Tickotsky (Eds.), *Contemporary endodontics for children and adolescents*, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23980-9_17.
6. Harlamb, S. (2016). Management of incompletely developed teeth requiring root canal treatment. *Aust Dent J*, 61(1), 95–106. DOI: <https://doi.org/10.1111/adj.12401>.
7. Chauhan, S., Chauhan, R., Bhasin, P., & Sharaf, B. G. (2025). Present status and future directions: Apexification. *World J Methodol*, 15(1), 96923. DOI: <https://doi.org/10.5662/wjm.v15.i1.96923>.
8. American Association of Endodontics. (2018). AAE clinical considerations for a regenerative procedure (Revised 4/1/2018).
9. Smith, A. J., Duncan, H. F., Diogenes, A., Simon, S., & Cooper, P. R. (2016). Exploiting the bioactive properties of the dentin-pulp complex in regenerative endodontics. *J Endod*, 42(1), 47–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.10.019>.
10. Xie, Z., Shen, Z., Zhan, P., Yang, J., Huang, Q., Huang, S., et al. (2021). Functional dental pulp regeneration: Basic research and clinical translation. *Int J Molecular Sci*, 22(16), 8991. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22168991>.
11. Fried, K., & Gibbs, J. L. (2014). Dental pulp innervation. In M. Goldberg (Ed.), *The dental pulp: Biology, pathology, and regenerative therapies* (pp. 75–95). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55160-4>. ISBN: 978-3-642-55159-8.
12. Ricucci, D., Siqueira, J. F., Jr., Loghini, S., & Lin, L. M. (2017). Pulp and apical tissue response to deep caries in immature teeth: A histologic and histobacteriologic study. *J Dent*, 56, 19–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.10.005>.
13. Kim, S. G., Malek, M., Sigurdsson, A., Lin, L. M., & Kahler, B. (2018). Regenerative endodontics: A comprehensive review. *Int Endod J*, 51(12), 1367–1388. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.12954>.
14. Shah, D., Lynd, T., Ho, D., Chen, J., Vines, J., Jung, H. D., Kim, J. H., Zhang, P., Wu, H., Jun, H. W., & Cheon, K. (2020). Pulp-dentin tissue healing response: A discussion of current biomedical approaches. *J Clin Med*, 9(2), 434. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm9020434>.
15. American Association of Endodontists. (2016). AAE clinical considerations for a regenerative procedure. American Association of Endodontists.
16. Duncan, H. F. (2022). Present status and future directions—Vital pulp treatment and pulp preservation strategies. *Int Endod J*, 55(4), 497–511. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13688>.
17. Galler, K. M., D'Souza, R. N., Hartgerink, J. D., & Schmalz, G. (2011). Scaffolds for dental pulp tissue engineering. *Advances in Dent Res*, 23(3), 333–339. DOI: <https://doi.org/10.1177/0022034511405326>.

18. Khan, M., & Jindal, M. (2023). Newer prospects of regenerative endodontics: A comprehensive and updated review of literature. *Journal of the Scientific Society*, 50(3), 299–306. DOI: https://doi.org/10.4103/jss.jss_214_22.
19. Jayadevan, V., Gehlot, P. M., Manjunath, V., Madhunapantula, S. V., & Lakshmikanth, J. S. (2021). A comparative evaluation of Advanced Platelet-Rich Fibrin (A-PRF) and Platelet-Rich Fibrin (PRF) as a scaffold in regenerative endodontic treatment of traumatized immature non-vital permanent anterior teeth: A prospective clinical study. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 13(5), e463–e472. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.57902>.
20. Leveque, M., Bekhouche, M., Farges, J.-C., Aussel, A., Sy, K., Richert, R., & Ducret, M. (2023). Bioactive endodontic hydrogels: From parameters to personalized medicine. *Int J Mol Sci*, 24(18), 14056. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241814056>.
21. Namazi, S., Mahmoud, A., Dal Fabbro, R., Han, Y., Xu, J., Sasaki, H., Fenno, J., & Bottino, M. (2023). Multifunctional and biodegradable methacrylated gelatin/Aloe vera nanofibers for endodontic disinfection and immunomodulation. *Biomater Adv*, 150, 213427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213427>.
22. Colombo, J. S., Moore, A. N., Hartgerink, J. D., & D'Souza, R. N. (2014). Scaffolds to control inflammation and facilitate dental pulp regeneration. *J Endod*, 40(4), S6–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.01.019>.
23. Jankowska, A., Frąckiewicz, W., Kus-Bartoszek, A., Wdowiak-Szymanik, A., & Jarzabek, A. (2025). Effectiveness of treatment of periapical lesions in mature and immature permanent teeth depending on the treatment method used: A critical narrative review guided by systematic principles. *J Clin Med*, 14(14), 5083. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm14145083>.
24. Allothman, F., Hakami, L., Alnasser, A., AlGhamdi, F., Alamri, A., & Almutairii, B. (2024). Recent advances in regenerative endodontics: A review of current techniques and future directions. *Cureus*, 16(1). DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.74121>.
25. Setzer, F. C., Kataoka, S. H., Natrielli, F., Gondim-Junior, E., & Caldeira, C. L. (2012). Clinical diagnosis of pulp inflammation based on pulp oxygenation rates measured by pulse oximetry. *J Endod*, 38(7), 880–883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.03.027>.
26. Sharma, A., Madan, M., Shahi, P., Sood, P., & Shahi, N. (2015). Comparative study of pulp vitality in primary and young permanent molars in human children with pulse oximeter and electric pulp tester. *Int J Clin Pediatr Dent*, 8(2), 94–98. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1291>.
27. Knight, A., Blewitt, I., Al-Nuaimi, N., Watson, T., Herzog, D., Festy, F., et al. (2020). Rapid chairside microbial detection predicts endodontic treatment outcome. *J Clin Med*, 9(7), 2086. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm9072086>.
28. Karrar, R. N., Cushley, S., Duncan, H. F., et al. (2023). Molecular biomarkers for objective assessment of symptomatic pulpitis: A systematic review and meta-analysis. *J Endod*, 56(10), 1160–1177. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13950>.
29. Fouad, A. F. (2022). Molecular characterization of irreversible pulpitis: A protocol proposal and preliminary data. *Front Dent Med*, 3, 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdmed.2022.867414>.
30. Lo Giudice, R., Nicita, F., Puleio, F., Alibrandi, A., Cervino, G., Lizio, A. S., & Pantaleo, G. (2018). Accuracy of periapical radiography and CBCT in endodontic evaluation. *Int J Dent*, 2514243. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2514243>.
31. Saidi, A., Naaman, A., & Zogheib, C. (2015). Accuracy of cone-beam computed tomography and periapical radiography in endodontically treated teeth evaluation: A five-year retrospective study. *J Int Oral Health*, 7(3), 15–19. PMID: 25878472.
32. Ye, J., & Liang, Y. (2023). A prevalence survey of cone-beam computed tomography use among endodontic practitioners. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 55(1), 114–119. DOI: <https://doi.org/10.19723/j.issn.1671-167X.2023.01.017>.
33. European Society of Endodontology (ESE). (2019). European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in endodontics. *Int Endod J*, 52(12), 1675–1678. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13187>.
34. Zhang, S., Liu, Y., Li, D., et al. (2025). Artificial intelligence- and pediatric CBCT-aided developmental recognition and personalized treatment of periapical diseases. *The Innovation Medicine*, 3(2), 100118. DOI: <https://doi.org/10.59717/j.xinn-med.2025.100118>.
35. La Rosa, S., Quinzi, V., Palazzo, G., Ronsivalle, V., & Lo Giudice, A. (2024). The implications of artificial intelligence in pedodontics: A scoping review of evidence-based literature. *Healthcare (Basel)*, 12(13), 1311. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare12131311>.
36. Shetty, H., Shetty, S., Kakade, A., Shetty, A., Karobari, M. I., Pawar, A. M., Marya, A., Heboyan, A., Venugopal, A., Nguyen, T. H., & Rokaya, D. (2021). Three-dimensional semi-automated volumetric assessment of the pulp space of teeth following regenerative dental procedures. *Scientific Reports*, 11(1), 21914. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01489-8>.
37. Kazimierczak, W., Kazimierczak, N., Issa, J., Wajer, R., Wajer, A., Kalka, S., & Serafin, Z. (2024). Endodontic treatment outcomes in cone beam computed tomography images—Assessment of the diagnostic accuracy of AI. *J Clin Med*, 13(14), 4116. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm13144116>.
38. Venkateshbabu, N., & Kulild, J. (2021). Artificial intelligence in endodontics: Current applications and future directions. *J Endod*, 47(9), 1362–1370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.06.003>.
39. Myers, W. C., & Fountain, S. B. (1974). Dental pulp regeneration aided by blood and blood substitutes after experimentally induced periapical infection. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 37(3), 441–50. DOI: [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(74\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0030-4220(74)90119-4).

40. Fouad, A. F. (2017). Microbial factors and antimicrobial strategies in dental pulp regeneration. *J Endod*, 43(9S), S46–S50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.06.010>.
41. Galler, K. M., Krastl, G., Simon, S., Van Gorp, G., Meschi, N., Vahedi, B., & Lambrechts, P. (2016). European Society of Endodontology position statement: Revitalization procedures. *Int Endod J*, 49(8), 717–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.12629>.
42. Murray, P. E. (2023). Review of guidance for the selection of regenerative endodontics, apexogenesis, apexification, pulpotomy, and other endodontic treatments for immature permanent teeth. *Int Endod J*, 56(2), 188–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13809>.
43. Widbillier, M., Althumairy, R. I., Diogenes, A. (2019). Direct and indirect effect of chlorhexidine on survival of stem cells from the apical papilla and its neutralization. *J Endod*, 45(2), 156–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.11.012>.
44. Hristov, K., Gateva, N., Stanimirov, P., Ishkitiev, N., & Doitchinova, L. (2020). Comparative analysis of root dentin loss when using modern mechanical cleaning instruments in immature permanent teeth. *Folia Med (Plovdiv)*, 62(2), 352–357. DOI: <https://doi.org/10.3897/folmed.62.e39515>.
45. Martin, D. E., De Almeida, J. F. A., Henry, M. A., et al. (2014). Concentration-dependent effect of sodium hypochlorite on stem cells of apical papilla survival and differentiation. *J Endod*, 40(1), 51–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.07.026>.
46. Galler, K. M., Buchalla, W., Hiller, K.-D., et al. (2015). Influence of root canal disinfectants on growth factor release from dentin. *J Endod*, 41(3), 363–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.11.021>.
47. Alexandre H Dos Reis-Prado, A. H., Abreu, L. G., Fagundes, R. R., Oliveira, et al. (2022). Influence of ethylenediaminetetraacetic acid on regenerative endodontics: A systematic review. *Int Endod J*, 55(6), 579–612. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13728>.
48. Reis-Prado, A. H. dos, de Jesus Soares, A., de Abreu, L. G., et al. (2024). Citric acid conditioning as an alternative to EDTA for growth factors release and stem cell response in regenerative endodontics: A systematic review of in vitro studies. *J Endod*, 50(2), 129–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.11.006>.
49. Kadulkar, N., Kataki, R., Deka, A., Medhi, H., Chakraborty, S., & Singh, A. (2024). Comparative evaluation of the effect of different chelating agents on mineral content and erosion of radicular dentine: A FESEM-EDS analysis. *Eur Endod J*, 9(1), 73–80. DOI: <https://doi.org/10.14744/eej.2023.19971>.
50. Ballal, N. V., Narkedamalli, R., Ruparel, N. B., Shenoy, P. A., Bhat, V. R., & Belle, V. S. (2022). Effect of maleic acid root conditioning on release of Transforming Growth Factor Beta 1 from infected root canal dentin. *J Endod*, 48(5), 620–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.02.007>.
51. Ballal, N. V., Gandhi, P., Shenoy, P. A., & Dummer, P. M. H. (2020). Evaluation of various irrigation activation systems to eliminate bacteria from the root canal system: A randomized controlled single blinded trial. *J Dent*, 99, 103412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103412>.
52. Vieira, W. A., de-Jesus-Soares, A., Lopes, E. M., Gomes, B. P. F. A., & Lima, B. P. (2024). Effect of supplementary sodium hypochlorite agitation techniques on an ex vivo oral multispecies biofilm during passive disinfection of simulated immature roots. *Int Endod J*, 57(7), 966–980. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.14053>.
53. Abat, V. H., Bayrak, G. D., & Gündoğar, M. (2025). Assessment of apical extrusion in regenerative endodontics: A comparative study of different irrigation methods using three-dimensional immature tooth models. *Odontology*, 113(1), 213–221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10266-024-00961-x>.
54. Andreasen, J. O., Farik, B., & Munksgaard, E. C. (2002). Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol*, 18(3), 134–7. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2002.00097.x>.
55. Kahler, B., Lu, J., & Taha, N. A. (2024). Regenerative endodontic treatment and traumatic dental injuries. *Dent Traumatol*, 40(6), 618–635. DOI: <https://doi.org/10.1111/edt.12979>.
56. Rybak, M. J., & McGrath, B. J. (1996). Combination antimicrobial therapy for bacterial infections. Guidelines for the clinician. *Drugs*, 52(3), 390–405. DOI: <https://doi.org/10.2165/00003495-199652030-00005>.
57. Segura-Egea, J. J., Gould, K., Şen, B. H., Jonasson, P., Cotti, E., Mazzoni, A., Sunay, H., Tjäderhane, L., & Dummer, P. M. H. (2018). European Society of Endodontology position statement: The use of antibiotics in endodontics. *Int Endod J*, 51(1), 20–25. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.12781>.
58. Kitikuson, P., & Srisuwan, T. (2016). Attachment ability of human apical papilla cells to root dentin surfaces treated with either 3Mix or calcium hydroxide. *J Endod*, 42(1), 89–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.08.021>.
59. Diogenes, A., Henry, M. A., Teixeira, F. B., & Hargreaves, K. M. (2013). An update on clinical regenerative endodontics. *Endod Topics*, 28(1), 2–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/etp.12040>.
60. Alobaid, A. S., Cortes, L. M., Lo, J., et al. (2014). Radiographic and clinical outcomes of the treatment of immature permanent teeth by revascularization or apexification: A pilot retrospective cohort study. *J Endod*, 40(8), 1063–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.02.016>.

61. Parchami, K., Dastorani, M., & Barati, M. (2024). What is the impact of endodontic irrigant solutions on the viability of stem cells from apical papilla in an in-vitro setting: A systematic review. *Saudi Dent J*, 36(9), 1170–1178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2024.07.006>.
62. de Oliveira, C. L. L., Ferreira, F. M., Puppini-Rontani, J., et al. (2025). Potential of irrigants and medicaments in regenerative endodontics: Insights from a systematic review on dentin growth factor release. *Odontology*. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10266-025-01128-y>.
63. Caviedes-Bucheli, J., Muñoz-Alvear, H. D., Lopez-Moncayo, L. F., Narvaez-Hidalgo, A., Zambrano-Guerrero, L., Gaviño-Orduña, J. F., Portigliatti, R., Gomez-Sosa, J. F., Munoz, H. R. (2022). Use of scaffolds and regenerative materials for the treatment of immature necrotic permanent teeth with periapical lesion: Umbrella review. *Int Endod J*, 55(10), 967–988. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13799>.
64. Shaik, I., Dasari, B., Kolichala, R., Doos, M., Qadri, F., Arokiyasamy, J. L., & Tiwari, R. V. C. (2021). Comparison of the success rate of mineral trioxide aggregate, Endosequence Bioceramic Root Repair Material, and calcium hydroxide for apexification of immature permanent teeth: Systematic review and meta-analysis. *J Pharm Bioallied Sci*, 13(1), S43–S47. DOI: https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_810_20.
65. Ghaly, M. S., Abozena, N. I., Ghouraba, R. F., Kabbash, I. A., & El-Desouky, S. S. (2025). Clinical and radiographic evaluation of premixed bioceramic putty as an apical plug in nonvital immature anterior permanent teeth. *Sci Rep*, 15(1), 26487. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11407-x>.
66. Eldehna, A. M., Abdelkafy, H., Salem, N. A., Elzahar, S., Abdel Ghany, D. M., Abd Allah, N. F., El Kharadly, D. Y., & Elashiry, M. M. (2025). Micro-CT analysis of apical plug using various premixed bio-ceramic putties: An in vitro study. *Eur Endod J*, 10(1), 18–26. DOI: <https://doi.org/10.14744/eej.2024.04796>.
67. Mathew, A. I., Lee, S. C., Rossi-Fedele, G., Bogen, G., Nagendrababu, V., & Ha, W. N. (2021). Comparative evaluation of mineral trioxide aggregate obturation using four different techniques—A laboratory study. *Materials*, 14(11), 3126. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14113126>.
68. An, H. J., Yoon, H., Jung, H. I., Shin, D. H., & Song, M. (2021). Comparison of obturation quality after MTA orthograde filling with various obturation techniques. *J Clin Med*, 10(8), 1719. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10081719>.
69. Bogen, G., & Kuttler, S. (2009). Mineral trioxide aggregate obturation: A review and case series. *J Endod*, 35(6), 777–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.03.006>.
70. Odabaşı Tezer, E., Buyuksungur, A., Celikten, B., Dursun, P. H., & Sevimay, F. S. (2024). Effects of access cavity design and placement techniques on mineral trioxide aggregate obturation quality in simulated immature teeth: A micro-computed tomography study. *Medicina*, 60(6), 878. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina60060878>.
71. Hristov, K., & Bogovska-Gigova, R. (2025). A micro-computed tomography analysis of void formation in apical plugs created with calcium silicate-based materials using various application techniques in 3D-printed simulated immature teeth. *Dent J*, 13(9), 385. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj13090385>.
72. Cvek, M. (1992). Prognosis of luxated non-vital maxillary incisors treated with calcium hydroxide and filled with gutta-percha. A retrospective clinical study. *Endod Dent Traumatol*, 8(2), 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1992.tb00228.x>.
73. Wikström, A., Brundin, M., Mohmud, A., Anderson, M., & Tsilingaridis, G. (2024). Outcomes of apexification in immature traumatised necrotic teeth and risk factors for premature tooth loss: A 20-year longitudinal study. *Dent Traumatol*, 40(6), 658–671. DOI: <https://doi.org/10.1111/edt.12973>.
74. Kahler, B., Mistry, S., Moule, A., et al. (2014). Revascularization outcomes: A prospective analysis of 16 consecutive cases. *J Endod*, 40(3), 333–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.10.032>.
75. Ree, M. H., & Schwartz, R. S. (2017). Long-term success of nonvital, immature permanent incisors treated with a mineral trioxide aggregate plug and adhesive restorations: A case series from a private endodontic practice. *J Endod*, 43(8), 1370–1377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.02.017>.
76. Demirel, T., Bezgin, T., & Sari, Ş. (2021). Effects of root maturation and thickness variation in coronal mineral trioxide aggregate plugs under traumatic load on stress distribution in regenerative endodontic procedures: A 3-dimensional finite element analysis study. *J Endod*, 47(3), 492–499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.11.006>.
77. Dietschi, D., Duc, O., Krejci, I., & Sadan, A. (2007). Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: A systematic review of the literature—part 1. Composition and micro- and macrostructure alterations. *Quintessence Int*, 38(9), 733–743. PMID: 17873980.
78. Danwittayakorn, S., Banomyong, D., Ongchavalit, L., Ngoenwivatkul, Y., & Porkaew, P. (2019). Comparison of the effects of intraradicular materials on the incidence of fatal root fracture in immature teeth treated with mineral trioxide aggregate apexification: A retrospective study. *J Endod*, 45(8), 977–984.e1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.05.008>.

79. Chun, M., Silvestrin, T., Savignano, R., & Roque-Torres, G. D. (2023). Effects of apical barriers and root filling materials on stress distribution in immature teeth: Finite element analysis study. *J Endod*, 49(5), 575–582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.03.009>.
80. Pereira, R. A. S., de Bragança, G. F., Vilela, A., et al. (2020). Post-gel and total shrinkage stress of conventional and bulk-fill resin composites in endodontically-treated molars. *Oper Dent*, 45(5), E217–E226. DOI: <https://doi.org/10.2341/19-187-L>.
81. de Souza, G. L., de Bragança, G. F., Vilela, A. B. F., et al. (2025). Stress in immature incisor treated with regenerative endodontics or restored with bulk-fill resin composite: A 2D finite element analysis. *Aust Endod J*, Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1111/aej.12981>.
82. da Costa Vieira, L. C. G., Neves, G. S. T., Amaral, G., et al. (2022). Does the use of fiber posts increase the fracture resistance of simulated immature teeth? A systematic review. *Odontology*, 110(4), 619–633. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10266-022-00707-7>.
83. Balkaya, H., Topcuoglu, H. S., Demirbuga, S., Kafdag, O., & Topcuoglu, G. (2022). Effect of different coronal restorations on the fracture resistance of teeth with simulated regenerative endodontic treatment: An in vitro study. *Aust Endod J*, 48(2), 331–337. DOI: <https://doi.org/10.1111/aej.12573>.
84. Belli, S., Eraslan, O., & Eskitascioglu, G. (2018). Effect of different treatment options on biomechanics of immature teeth: A finite element stress analysis study. *J Endod*, 44(3), 475–479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.08.037>.
85. Duncan, H. F., Nagendrababu, V., El-Karim, I., & Dummer, P. M. H. (2021). Outcome measures to assess the effectiveness of endodontic treatment for pulpitis and apical periodontitis for use in the development of European Society of Endodontology S3-level clinical practice guidelines: A consensus-based development. *Int Endod J*, 54(12), 2184–2194. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.13627>.

Endodontic Treatment of Permanent Immature Teeth: Current State of the Issue

Kistenjuk, M., Bidenko, N.

Educational and Research Institute of Dentistry, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Relevance. Recently, a significant number of publications have appeared that aim to change approaches to endodontic treatment of immature teeth. At the same time, there remains a high need for endodontic treatment of such teeth due to complications of caries and dental trauma, which makes this research relevant.

Objective. To study the current state regarding approaches to the treatment of immature teeth and to summarize their main directions and prospects.

Material and methods. During the study, the bibliosemantic method was used, and sources on the endodontic treatment of teeth with incomplete root formation published over the past 10 years were identified.

Results. The analysis of the current state of research on endodontic treatment of immature teeth allowed identifying modern directions on this issue, namely: (1) improvement of regenerative techniques, use of tissue engineering and various biomaterials, which in the future will allow controlling the processes of healing and regeneration of root tissues; (2) continuation of research on optical methods for diagnosing pulp vitality; (3) finding new methods for detecting microorganisms in the root canal or biomarkers of inflammation directly from pulp or periodontal tissues; (4) expanding the possibilities of diagnosis and planning of endodontic treatment using CBCT and artificial intelligence-based platforms and the prospects for their further development; (5) searching for optimal protocols for chemomechanical root canal preparation that would achieve maximally effective canal disinfection with minimal negative impact of agents on the regenerative potential of tissues and maximum preservation of hard root tissues; (6) obtaining reliable results regarding clinical success, technical properties, and hermeticity of various bio-ceramic materials in comparison with traditional MTA, as well as techniques for their placement into the canal; (7) continued search for optimal materials for restoring the cervical third of the root.

Conclusions. Endodontic treatment of immature teeth with pulp necrosis remains a relevant issue in pediatric dentistry, given the high need for this treatment and its lower effectiveness compared to that of mature teeth. Scientific advances have recently significantly expanded clinicians' capabilities in the endodontic treatment of immature teeth and hold great potential to improve treatment protocols and achieve more predictable results. The main goals of such therapy are the healing of the inflammatory process in the periradicular tissues and long-term preservation of tooth function.

Keywords: *endodontic treatment, regenerative endodontics, immature teeth, incompletely formed tooth roots, apexification.*

Кістенюк Марія Олегівна — аспірант кафедри дитячої терапевтичної стоматології та профілактики стоматологічних захворювань ННІС НМУ імені О. О. Богомольця, м. Київ, Україна.

Біденко Наталія Василівна — доктор медичних наук, професор кафедри дитячої терапевтичної стоматології та профілактики стоматологічних захворювань ННІС НМУ імені О. О. Богомольця, м. Київ, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1132-2446>

Стаття: надійшла до редакції 01.09.2025 р.; прийнята до друку 16.10.2025 р.