

*Подільчук Денис Вікторович,**аспірант кафедри стоматології**Інституту післядипломної освіти**Національний медичний університет імені О.О. Богомольця**ORCID ID: 0009-0006-5493-0707**Researcher ID: NTQ-6891-2025**м. Київ, Україна*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІРИГАЦІЙНИХ РОЗЧИНІВ НА ДЕНТИН РІЗНИХ АНАТОМІЧНИХ ЗОН КОРЕНЕВОГО КАНАЛУ

Вступ. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності й безпеки ендодонтичного лікування шляхом удосконалення систем іригації, що забезпечують одночасно глибоку дезінфекцію, збереження мікроструктури дентину та стабільність адгезійного зв'язку. Особливого значення набувають сучасні підходи, орієнтовані на біосумісність, зокрема концепція Continuous Chelation, яка передбачає м'яку хелатувальну дію та мінімізацію ерозійних ушкоджень.

Мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні та порівняльному аналізі впливу різних іригаційних агентів на морфологічну структуру, фізико-хімічні властивості й адгезійний потенціал дентину в різних анатомічних зонах кореневого каналу, а також у визначенні оптимальних параметрів їхнього застосування для підвищення ефективності та біосумісності ендодонтичного лікування.

Методологія ґрунтується на ретроспективному аналізі даних морфологічних та біофізичних показників, а також мікроструктурного аналізу, оцінки мікротвердості, проникності та якісних змін дентину після дії іригаційних систем, включно з протоколами традиційного та безперервного хелатування, наведених у доступних літературних джерелах.

Результати дослідження продемонстрували, що ефективність очищення кореневого каналу визначається збалансованим поєднанням хімічної активності іригаційних агентів та способу їхньої активації. Доведено, що комбіноване застосування гіпохлориту натрію та етилендіамінтетраоцтової кислоти або біосумісних хелаторів типу етидронові кислоти забезпечує високий рівень очищення за мінімальних структурних змін дентину.

Висновки підтверджують, що оптимізація іригаційних протоколів має враховувати анатомічну зональність кореневого каналу, морфологічну чутливість дентину та вибір хелаторів із прогнозованим профілем дії. Перспективним напрямом є застосування Continuous Chelation, яке сприяє підтриманню мікромеханічної цілісності дентину та підвищує довготривалу герметичність ендодонтичної obturaції.

Ключові слова: дентин, іригаційні агенти, ендодонтична іригація, хімічна взаємодія, мікроструктура, адгезія, демінералізація, біосумісність.

Podilchuk Denys Viktorovych, Postgraduate Student at the Department of Dentistry, Institute of Postgraduate Education, Bohomolets National Medical University, ORCID ID: 0009-0006-5493-0707, ResearcherID: NTQ-6891-2025, Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECT OF IRRIGATION SOLUTIONS ON DENTIN IN DIFFERENT ANATOMICAL ZONES OF THE ROOT CANAL

Introduction. The relevance of this study stems from the need to enhance the efficacy and safety of endodontic treatment through the improvement of irrigation systems that simultaneously ensure deep disinfection, preservation of dentin microstructure, and stability of adhesive bonding. Modern approaches focused on biocompatibility are of particular importance, specifically the Continuous Chelation concept, which involves gentle chelating action and minimization of erosive damage.

The aim of this study is to provide scientific substantiation and comparative analysis of the effect of various irrigation agents on the morphological structure, physicochemical properties, and adhesive potential of dentin in different anatomical zones of the root canal, as well as to determine optimal parameters for their application to improve the efficacy and biocompatibility of endodontic treatment.

The methodology is based on a retrospective analysis of data on morphological and biophysical parameters, as well as microstructural analysis, assessment of microhardness, permeability, and qualitative changes in dentin following the action of irrigation systems, including conventional and continuous chelation protocols, as reported in the available scientific literature. The study results demonstrated that the effectiveness of root canal cleaning is determined by a balanced combination of the chemical activity of irrigation agents and their mode of activation. It has been proven that the combined application of sodium hypochlorite and ethylenediaminetetraacetic acid or biocompatible chelators such as etidronic acid provides a high level of cleaning with minimal structural changes to dentin.

The conclusions confirm that optimization of irrigation protocols should account for the anatomical zonality of the root canal, morphological sensitivity of dentin, and selection of chelators with a predictable action profile. A promising direction is the application of Continuous Chelation, which promotes maintenance of the micromechanical integrity of dentin and enhances the long-term seal of endodontic obturation.

Key words: dentin, irrigation agents, endodontic irrigation, chemical interaction, microstructure, adhesion, demineralization, biocompatibility.

Вступ. Проблема дослідження зумовлена складною взаємодією хімічних агентів і структурних особливостей дентину під час ендодонтичної обробки, коли іригаційні розчини, призначені для забезпечення антисептичного ефекту, одночасно впливають на фізико-хімічні властивості твердих тканин зуба. В умовах підвищених вимог до якості очищення та дезінфекції корневих каналів важливим науковим завданням є встановлення закономірностей зміни морфологічної структури дентину під дією різних іригаційних систем залежно від анатомічної зони кореневого каналу. Це безпосередньо пов'язано з важливими практичними аспектами сучасної ендодонтії: забезпеченням ефективної адгезії пломбувальних матеріалів, збереженням міцності дентину та мінімізацією ризику мікротріщин. Недостатня кількість порівняльних даних щодо впливу різних комбінацій розчинів, їхньої концентрації та тривалості експозиції створює наукову невизначеність, що ускладнює розроблення стандартизованих протоколів іригації. У цьому контексті дослідження спрямоване на поглиблення уявлень про структурно-функціональні зміни дентину, обґрунтування оптимальних умов застосування іригаційних агентів та підвищення довготривалої герметичності obturaції. Отримані результати є важливими як для розвитку наукової бази ендодонтичної біоматеріалознавчої школи, так і для вдосконалення клінічних алгоритмів лікування з урахуванням анатомічної диференціації зон кореневого каналу.

Аналіз сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям присвячений вивченню впливу іригаційних агентів на біоплівку та очищення корневих каналів у різних анатомічних ділянках. У дослідженні М. М. Рожка та співавторів доведено, що гіпохлорит натрію (NaOCl), етилендіамінтетраоцтова кислота (EDTA) та хлоргексидин (CHX) чинять різноспрямовану дію на мікробні біоплівки, причому в коронковій зоні відбувається ефективна дезінтеграція матриксу, тоді як в апікальній частині зберігається частина життєздатних мікроколоній через нижчу гідродинамічну активність [1]. У своїй праці А. М. Потапчук та співавтори порівняли ефективність ультразвукової, фото- та звукової активації іригантів, встановивши, що комбінація EDTA і NaOCl з ультразвуковою активацією найкраще очищує середню третину каналу, тоді як апікальна частина залишається частково контамінованою [2]. Дослідник С. Геранін доводить, що інтенсивне застосування активованих розчинів у апікальній третині може підвищувати ризик екструзії, провокуючи подразнення перирадикулярних тканин. Зважаючи на це режими іригації мають контролюватися з урахуванням довжини робочого інструмента [3]. У клінічній практиці стоматологів Н. Г. Гаджула та А. В. Костючик виявили істотну варіабельність застосування NaOCl, EDTA та CHX, що впливає на якість очищення апікальної ділянки, де через обмежений доступ зберігається змазаний шар [4]. Подальші дослідження в цьому напрямі мають бути спрямовані на створення стандартизованих протоколів активації з оптимізацією потоку й контрольованим тиском, що забезпечить елі-

мінацію біоплівки без пошкодження перирадикулярних тканин.

Другий напрям стосується вивчення структурно-хімічних і механічних змін дентину внаслідок дії іригаційних розчинів. У своєму дослідженні Дж. А. Маркес та співавтори узагальнили, що NaOCl і EDTA викликають помітну демінералізацію в коронковій третині через більшу кількість дентинних каналців, тоді як апікальна зона залишається більш мінералізованою [5]. П. П. Рас та співавтори довели, що апікальний дентин має вищу резистентність до дії іригантів, однак у ньому частіше зберігається змазаний шар, який ускладнює подальшу obturaцію [6]. Здійснивши метааналіз, С. Агарвал та співавтори, підтвердили закономірне зменшення мікротвердості дентину після застосування EDTA та NaOCl. Причому коронкова зона є найбільш ураженою, середня – помірно, а апікальна – мінімально [7]. А. О. Барва та співавтори встановили, що тривала дія хелаторів активує матриксні металопротеїнази (ММР), що прискорює деградацію колагену в коронковій частині, а застосування хлоргексидину як інгібітора ММП зменшує цей ефект [8]. За допомогою FTIR, SEM та EDS І. Падмакумар та співавтори довели, що після дії EDTA і NaOCl змінюється співвідношення кальцію та фосфору, особливо в коронковій зоні, де відбувається виражене зниження мінерального компонента [9]. Подальші дослідження цього напрямку мають бути зосереджені на кореляції між рівнем демінералізації, мікротвердістю та концентрацією реагентів для визначення оптимальних параметрів експозиції в кожній третині каналу.

Третій напрям охоплює дослідження очищення змазаного шару та проникності дентину під дією іригаційних систем. Так, Дж. П. Мартінго та співавтори довели, що попередня іригація NaOCl і EDTA підвищує проникність дентину для мінералотріоксидного цементу (МТА) в коронковій та середній третинах, тоді як в апікальній ефективність дифузії знижується [10]. Метааналіз С. Таварес та співавторів продемонстрував, що застосування хелаторів сприяє вивільненню чинників росту з дентину, проте надмірна експозиція в коронковій третині підвищує ризик ерозії [11]. Л. Ші та співавтори виявили, що поєднання EDTA й NaOCl з ультразвуковою активацією (PUI) значно покращує видалення змазаного шару в середній третині, тоді як апікальна зона потребує додаткових методів активації [12]. У своїй праці М. Аль-Бататі та А. АбуМостафа показали, що фінальна іригація EDTA з NaOCl видалює змазаний шар у верхніх частинах каналу, але спричиняє ерозію дентину, тоді як апікальна зона зберігає структурну цілісність, хоча й очищується гірше [13]. У межах цього напрямку подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення параметрів ультразвукової, негативної та фотоактивації з урахуванням гідродинаміки середньої та апікальної третин.

Четвертий напрям об'єднує дослідження комплексного очищення, дезінфекції та збереження ультраструктури дентину. Так, Д. Барселлос та співавтори довели, що гліколева кислота як альтернатива EDTA

зменшує ризик ерозії, зберігаючи ефективність видалення змазаного шару, особливо в середній третині [14]. Дж. Рейес-Кармона узагальнив дані щодо комбінованих протоколів іригації, довівши, що послідовність NaOCl – EDTA – слабкий буфер забезпечує оптимальний баланс між очищенням і збереженням механічних властивостей дентину. Крім того, коронкова третина найбільш чутлива до перерозм'якшення, середня – до зміни шорсткості, а апікальна – до залишкової контамінації [15]. Подальші дослідження в цьому напрямі мають бути спрямовані на створення персоналізованих зонально специфічних протоколів іригації з урахуванням морфології каналу, концентрацій реагентів і параметрів активації, що дасть змогу досягти одночасного очищення, дезінфекції та збереження мікромеханічної цілісності дентину.

Попри численні дослідження, низка аспектів проблеми взаємодії іригаційних розчинів із дентином залишається нерозв'язаною. Недостатньо з'ясовано механізми впливу хімічного складу, концентрації та тривалості дії розчинів на структурну цілісність дентину в різних анатомічних зонах кореневого каналу. Наявні експерименти здебільшого фрагментарні й не враховують комплексний вплив морфологічних, фізико-хімічних і біомеханічних чинників, що зумовлює розбіжності в клінічних рекомендаціях. Обмеження методів оцінювання мікроструктурних змін, відсутність стандартизованих протоколів активації та недостатня емпірична база не дають змоги сформувати універсальну систему параметрів безпечної іригації. Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом поєднання морфологічного, біофізичного та порівняльно-аналітичного аналізу для виявлення закономірностей взаємодії іригаційних агентів із мінеральною та органічною фазами дентину. Розроблена модель дає змогу кількісно оцінити зміни мікротвердості, шорсткості та адгезії залежно від зони каналу та типу розчину. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для розроблення анатомічно орієнтованих, біосумісних іригаційних протоколів, що підвищують ефективність дезінфекції й забезпечують довготривалу герметичність ендодонтичного лікування.

Мета статті – на основі доступних наукових джерел обґрунтувати необхідність оптимізації ендодонтичного лікування шляхом порівняльного аналізу впливу різних іригаційних розчинів на морфологічну структуру, фізико-хімічні властивості та адгезійний потенціал дентину в різних анатомічних зонах кореневого каналу для досягнення довготривалої герметичності пломбування.

З урахуванням доступних для аналізу наукових даних:

1. Визначити морфологічні та структурно-функціональні відмінності дентину різних анатомічних зон кореневого каналу та їхній вплив на реакцію тканин до іригаційних агентів.

2. Дослідити хімічну взаємодію іригаційних розчинів із мінеральними й органічними компонентами дентину та встановити закономірності зміни його фізико-хімічних властивостей.

3. Проаналізувати основні наслідки демінералізації та ерозійних змін дентину й розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів іригації для підвищення ефективності й безпечності ендодонтичного лікування.

Методологія та методи дослідження. Дослідження ґрунтується на комплексному аналізі наукових публікацій, індексованих у базах даних Scopus, PubMed, Web of Science та Google Scholar, за чітко визначений період 2015–2025 років. Відбір джерел здійснювали з урахуванням їхньої належності до рецензованих видань, безпосередньої спрямованості на вивчення впливу іригаційних розчинів на дентин, наявності експериментальних або клінічних даних щодо морфологічних, фізико-хімічних та біомеханічних змін твердих тканин зуба, а також відповідності сучасним клінічним протоколам ендодонтичного лікування. Публікації, що мали оглядовий або описовий характер без кількісних показників змін дентину, до аналізу не включалися.

Метод порівняльного аналізу застосовано для узагальнення результатів експериментальних і клінічних досліджень щодо змін мікроструктури, мікротвердості, шорсткості та проникності дентину під впливом різних іригаційних агентів і способів їхньої активації. Для оцінки тенденцій розвитку проблематики використано контент-аналіз наукових публікацій, який передбачав систематизацію даних за типом іригаційних розчинів, режимом і тривалістю їх застосування, анатомічною зональністю кореневого каналу, характером мікроструктурних і ерозійних змін дентину, а також наслідками цих змін для адгезійного потенціалу та довготривалої герметичності obturaції. Окрім цього, здійснено порівняльний аналіз ефективності хімічних та комбінованих систем іригації з урахуванням фізичних методів активації, що дозволило узагальнити їхній вплив на збереження мікромеханічної цілісності дентину. Для формування логічно послідовної аргументації та обґрунтування практичних висновків застосовано метод логіко-структурного узагальнення, який забезпечив наукову коректність аналізу та сформував цілісне бачення сучасного стану і перспектив розвитку ендодонтичних іригаційних технологій.

Виклад основного матеріалу. Структурно-функціональні відмінності дентину в різних анатомічних зонах кореневого каналу мають важливе значення для розуміння реакції тканин на дію іригаційних розчинів. Дентин – це складна біокомпозитна структура, яка містить мінеральну (переважно гідроксиапатит), органічну (колаген I типу) та водну фази. У коронковій зоні переважає вищий ступінь мінералізації та щільність дентинних каналців, що забезпечує більшу механічну міцність і меншу проникність для розчинів. У середній зоні кореневого каналу поступове зменшення кількості та діаметра дентинних каналців призводить до підвищення опору твердих тканин хімічній дії іригаційних розчинів. Апікальна зона характеризується мінімальною кількістю дентинних каналців, наявністю перитубулярних мінералізованих нашарувань і складнішою топографією, що обмежує ефективність іригації, але водночас підвищує ризик неповного очищення від органічного залишку (табл. 1).

Таблиця 1

Структурно-функціональні характеристики дентину різних анатомічних зон кореневого каналу

Анатомічна зона кореневого каналу	Щільність дентинних каналців, на мм ²	Середній діаметр каналців, мкм	Рівень мінералізації, %	Відносна чутливість до іригаційних розчинів
Коронкова	45 000–65 000	2,5–3,0	72–75	Висока, із ризиком демінералізації
Середня	25 000–40 000	1,5–2,0	68–72	Помірна, зі збереженням структури
Апікальна	8 000–20 000	0,8–1,2	65–68	Низька, але зі зменшеною ефективністю очищення

Джерело: сформовано автором на підставі [1, с. 37–38; 5, с. 608–609; 6; 9].

Морфологічна неоднорідність дентину визначає не лише механізм проникнення, а й кінетику взаємодії іригаційних агентів із тканинами кореневого каналу. У коронковій зоні, де дентинні каналці мають найбільший діаметр і густоту, спостерігається найвища хімічна реактивність: активні речовини швидше дифундують у міжтубулярну субстанцію, спричиняючи часткову демінералізацію та денатурацію колагенових волокон. Така взаємодія не завжди підвищує адгезійний потенціал, оскільки надмірне руйнування органічної матриці може, навпаки, зменшувати ефективність утворення гібридного шару та знижувати міцність зчеплення силера з дентином. У сучасній клінічній практиці ефективність очищення корневих каналів досягається не шляхом скорочення часу дії, а завдяки контрольованому застосуванню гіпохлориту натрію у концентрації 5,25 % і більше, що може використовуватися протягом триваліших періодів (у тому числі понад 20 хвилин в інфікованих випадках) за умови його активованої подачі та регулярного оновлення. Підтримання мікроструктурної цілісності дентину сприяє збереженню фізіологічного мікробного гомеостазу, а завершальне промивання нейтральними буферними розчинами забезпечує видалення залишків NaOCl та стабілізацію поверхні перед подальшими етапами обробки [1, с. 37–38]. У середній зоні, де мікроструктура дентину щільніша, спостерігається зниження швидкості дифузії активних компонентів, тому ефективність очищення досягається переважно за допомогою хелатувальних агентів, зокрема етилендіамінтетраоцтової кислоти (Ethylenediaminetetraacetic Acid, EDTA), концентрацією 17 %, яка вибірково зв'язує кальцій із поверхні перитубулярного шару [9]. Практичні спостереження підтверджують, що поетапне застосування NaOCl і EDTA забезпечує повне видалення змазаного шару без істотного пошкодження колагенової матриці, що критично важливо для стабільної адгезії силерів. Апікальна зона, яка характеризується мінімальною кількістю та діаметром каналців, становить найбільшу клінічну складність. Тут іригаційні розчини діють переважно на поверхневому рівні, а механічне видалення детриту ускладнене через складну топографію каналу. Для підвищення глибоки проникнення іригаційних розчинів без ризику виходу за апікальний отвір застосовують різні методи енергетичної активації. Найпоширенішою є пасивна ультразвукова іригація (Passive Ultrasonic Irrigation, PUI), що забезпечує кавітаційну та акустичну мікро-

струминність у межах апікальної третини. Альтернативою є системи негативного тиску (Negative Pressure Irrigation, NPI), зокрема EndoVac, які створюють контрольований відсмоктувальний потік, дозволяючи безпечно доставляти розчин до робочої довжини без ризику екструзії. Окрему групу становлять технології мультифазної акустичної активації, такі як GentleWave, що поєднують багаточастотні ультразвукові хвилі та високошвидкісний ламінарний потік, але не належать до систем NPI. Емпіричні дослідження демонструють, що застосування PUI, NPI або мультиакустичних систем типу GentleWave підвищує ефективність очищення апікальної третини в середньому на 25–30 % без порушення мікроструктурної цілісності дентину [5]. Отже, практичне значення встановлених закономірностей полягає в необхідності анатомічно орієнтованої стратегії іригації, що враховує морфологічну будову дентину, хімічну активність розчинів і параметри активації. Сучасна ендодонтична практика поступово переходить до концепції біосумісної іригації (Biocompatible Irrigation Concept, BIC), спрямованої на досягнення балансу між ефективністю дезінфекції, збереженням механічної міцності дентину та мінімізацією цитотоксичного впливу на періапикальні тканини.

Хімічна взаємодія іригаційних розчинів із мінеральними та органічними компонентами дентину визначає основні зміни його фізико-механічних властивостей у процесі ендодонтичного лікування. Структура дентину, що складається з гідроксиапатиту, колагену I типу та води, є чутливою до хімічних агентів, які порушують рівновагу між неорганічною та органічною фазами. Унаслідок взаємодії відбуваються процеси демінералізації, денатурації білкових компонентів і зміни поверхневої морфології, які безпосередньо впливають на мікротвердість, шорсткість і проникність дентину. З огляду на це аналіз хімічних механізмів дії іригаційних систем має як теоретичне, так і практичне значення для підвищення довговічності обтурації та адгезійної стабільності матеріалів (табл. 2).

У сучасній клінічній практиці ефективність хімічної взаємодії іригаційних систем із дентином визначається оптимальним балансом між якісним очищенням і збереженням механічної цілісності тканин. NaOCl ефективно розщеплює органічний матрикс та знижує бактеріальну контамінацію, проте його надмірна концентрація або тривалий контакт може призводити до послаблення колагенової мережі. EDTA сприяє роз-

Вплив іригаційних розчинів на фізико-хімічні властивості дентину

Іригаційний розчин	Основна хімічна дія	Зміна мікротвердості, %	Зміна шорсткості поверхні, %	Зміна проникності дентину, %	Потенційний клінічний ефект
NaOCl (2,5%)	Розщеплення органічної матриці	-15...-25	+10...+20	+30...+45	Ефективне очищення, але ризик ослаблення структури
EDTA (17%)	Хелатування кальцію, демінералізація поверхні	-20...-35	+25...+40	+20...+35	Підвищення адгезії, можливість ерозії внаслідок тривалого контакту
CA (10%)	Часткова демінералізація, видалення змазаного шару	-10...-20	+15...+25	+15...+30	М'яка дія, висока біосумісність
NaOCl + EDTA	Послідовна органічна та неорганічна дія	-30...-45	+40...+60	+35...+50	Максимальне очищення, ризик надмірного розм'якшення дентину
Дистильована вода (контроль)	Відсутність реакції	0	0	0	Без змін

Джерело: сформовано автором на підставі [5, с. 612–614; 6; 7; 8; 9; 14].

криттю дентинних каналців і створює мікрошорстку поверхню, що покращує змочуваність та адгезію силера, але потребує чіткого регламентування часу впливу. СА є альтернативою для біосумісних протоколів, що дають змогу уникнути надмірної демінералізації в пацієнтів із підвищеною чутливістю дентину [8]. Комбіноване застосування NaOCl і EDTA залишається клінічним стандартом, однак оптимальні результати досягаються лише за умов активації іригації ультразвуком або негативним тиском, що забезпечує рівномірний розподіл реагентів у всіх анатомічних зонах каналу [14]. На практиці саме контрольована хімічна модифікація поверхневого шару дентину визначає ефективність пломбування, довготривалу герметичність і біосумісність ендодонтичного втручання.

Ефективність очищення й дезінфекції кореневих каналів безпосередньо залежить від властивостей іригаційної системи, її здатності усувати органічні та неорганічні компоненти змазаного шару, а також від збереження структурної цілісності дентину після хімічної обробки. Сучасні ендодонтичні технології розглядають іригацію не лише як допоміжний етап механічної обробки, а як самостійну фазу біохімічної модифікації поверхні дентину. Вибір комбінацій іригаційних розчинів та методів їхньої активації визначає якість очищення дентинних каналців, глибину дезінфекції й рівень залишкової міцності дентину. Висока ефективність досягається тоді, коли хімічна активність розчину поєднується з фізичною енергією, здатною подолати поверхневу напругу, зруйнувати біоплівку та рівномірно розподілити реагент у складній анатомії каналу (табл. 3).

Результати порівняльного аналізу демонструють, що ефективність іригаційних систем визначається не лише хімічною активністю розчину, а й здатністю забезпечити його рівномірний розподіл і глибоке проникнення в дентинні каналці. Експериментально та

клінічно підтверджено, що комбінація NaOCl та EDTA в пасивному режимі забезпечує ефективне очищення. Однак ця ефективність обмежується поверхневою дією агентів через їхній високий поверхневий натяг і недостатню динаміку потоку в кореновому каналі.

Ультразвукова активація значно підвищує ефективність завдяки утворенню кавітаційних мікропухирців і потоків акустичної мікродструмінності, які не лише покращують видалення біоплівки, але й сприяють механічному вимиванню органічних решток із глибоких ділянок апікальної третини [15, с. 15–16]. Це сприяє зниженню бактеріального навантаження майже до стерильного рівня, не викликаючи критичних змін мікротвердості дентину. Ще перспективнішою є технологія негативного тиску (NPI), реалізована в системах типу EndoVac, які забезпечують контрольований ламінарний потік розчину з відсмоктуванням на апікальному рівні, що мінімізує ризик екструзії та покращує очищення апікальної третини [2]. Такий підхід мінімізує ризик виходу розчину за апікальний отвір, зберігаючи мікроструктурну цілісність дентину та забезпечуючи стабільність адгезійного шару під час обтурації. Практичні спостереження щодо застосування NPI демонструють оптимальний баланс: мікротвердість дентину зберігається на рівні приблизно 85–90 % від вихідної, тоді як ефективність видалення змазаного шару перевищує 95 % [5]. М'які системи на основі СА або CHX застосовуються, коли необхідно поєднати антимікробну активність із біосумісністю, наприклад, у пацієнтів із підвищеною чутливістю або після повторного ендодонтичного лікування. Вони демонструють позитивний профіль безпеки, проте не здатні забезпечити повне очищення апікальних зон без додаткової механічної чи ультразвукової активації. Отже, клінічна ефективність іригації нині розглядається як функція трьох параметрів: хімічної потужності, енергетичної активації та гідродинамічної

Порівняльна ефективність іригаційних систем за критеріями очищення, дезінфекції та збереження структури дентину

Іригаційна система	Хімічна композиція та метод активації	Ефективність видалення змазаного шару, %	Рівень дезінфекції (зниження бактеріального навантаження, %)	Зміна мікротвердості дентину, %	Клінічні особливості та зауваги
NaOCl (2,5 %) + EDTA (17 %) (пасивна іригація)	Послідовна дія без активації	70–80	85–90	–25...–35	Стандартний протокол, помірна ефективність у глибоких зонах
NaOCl + EDTA з ультразвуковою активацією (UA)	Енергія коливань 25–30 кГц	90–95	95–99	–20...–30	Підвищене очищення апікальної третини, рівномірна дезінфекція
NaOCl + EDTA з негативним тиском (NPI)	Система EndoVac або GentleWave	92–97	96–99	–15...–25	Мінімальний ризик екструзії, збереження мікроструктури дентину
NaOCl + CA (10%)	М'яка хелатувальна дія	80–85	85–90	–10...–20	Біосумісна альтернатива для пацієнтів із гіперчутливістю
CHX (0,2 %) + EDTA	Антимікробна дія без окиснення	75–80	90–95	–5...–10	Висока стабільність колагену, неефективне видалення неорганічного шару

Джерело: сформовано автором на підставі [2; 10; 11; 12.; 13; 15, с. 15–16].

керованості – і саме їхнє оптимальне поєднання визначає баланс між глибоким очищенням, стерильністю каналу та довготривалим збереженням структурної цілісності дентину.

Основні проблеми, пов'язані з надмірною демінералізацією дентину під дією агресивних іригаційних розчинів, мають переважно мікроструктурний і функціональний характер. Гіпохлорит натрію, володіючи потужною окисною активністю, руйнує білкову матрицю дентину, зокрема колагенові волокна, що забезпечують його еластичність і зв'язок між кристалами гідроксиапатиту. Це призводить до зниження мікротвердості на 25–40 % і утворення зон мікропористості, через які відбувається дифузія вологи та іонів, що надалі знижує адгезійну здатність силерів [15, с. 14]. Надмірне застосування хелатувальних агентів, таких як EDTA або CA, спричиняє інтенсивне вилугування кальцію та фосфатів, що призводить до втрати перитубулярної мінералізації та появи ерозійних дефектів на межі між дентинними каналцями. Такі дефекти порушують рівномірність поверхні, створюють ділянки ослаблення та знижують опір до механічних навантажень після obturaції.

Додатковою проблемою є зниження змочуваності поверхні дентину внаслідок змін у структурі колагенової сітки після тривалої дії NaOCl, що перешкоджає формуванню стабільного адгезійного шару. Відновлення мікроструктури в таких випадках є обмеженим навіть після промивання нейтральними розчинами, оскільки деградація колагену є незворотною. У системах із високою концентрацією іригаційних розчинів (понад 5 % NaOCl) спостерігається утворення перитубулярних тріщин, які розповсюджуються вздовж каналців і створюють потенційні шляхи для мікропроникності після пломбування [2].

У разі недостатнього контролю енергії ультразвукова активація іригаційних розчинів здатна посилювати ерозійні процеси, особливо в апікальній ділянці, де товщина дентинної стінки мінімальна. Перегрів розчину (понад 40 °C) призводить до локального розширення каналців і часткового руйнування міжтубулярного матриксу [5]. Водночас взаємодія між NaOCl та EDTA без чіткої послідовності застосування утворює хлорні побічні сполуки, які спричиняють окисну деградацію поверхні дентину та знижують його біосумісність.

Порушення адгезійних характеристик виявляється в зниженні сили зчеплення силера з дентином на 20–30 %, що безпосередньо впливає на герметичність obturaції [9]. Це зумовлено як надмірною демінералізацією, так і руйнуванням гібридного шару, який формується під час просочення смолистих компонентів у дентину структуру. У клінічній практиці це проявляється як мікропідтікання пломбувального матеріалу, післяопераційна чутливість та підвищений ризик рецидиву інфекції. Отже, головна проблема сучасних агресивних іригаційних систем полягає у відсутності чіткого контролю за глибиною демінералізації, що призводить до втрати балансу між антисептичною ефективністю та збереженням структурної та функціональної цілісності дентину.

Розроблення практичних рекомендацій щодо вибору складу, концентрації та послідовності іригаційних агентів має ґрунтуватися на анатомічній зональності кореневого каналу та фізико-хімічних особливостях дентину кожної з них. У коронковій частині, де дентин найбільш мінералізований і характеризується високою щільністю дентинних каналців, пріоритетом є ефективне видалення органічного компоненту змазаного шару без надмірної демінералізації. На цьому

етапі оптимально застосовувати гіпохлорит натрію у клінічно прийнятних концентраціях (5,25 %), який забезпечує прогнозовану протеолітичну дію за умови активованої подачі. Ефективне збереження колагенової матриці забезпечується не скороченням тривалості іригації, а контрольованим оновленням розчину та підтриманням біосумісного температурного режиму. Завершальне промивання нейтральним буфером стабілізує поверхню дентину перед подальшими етапами.

У середній зоні, де співвідношення органічної та мінеральної фаз є більш збалансованим, важливо мінімізувати мікроструктурні втрати, зберігаючи при цьому ефективність очищення. Тут доцільним є застосування методики Continuous Chelation, яка передбачає одночасну присутність гіпохлориту натрію та етидроновної кислоти (etidronic acid, НЕВР). На відміну від послідовного протоколу $\text{NaOCl} \rightarrow \text{EDTA}$, НЕВР не інактивує гіпохлорит і забезпечує повільну, м'яку й контрольовану хелатувальну дію. Це дозволяє підтримувати стабільне розкриття каналців, зменшуючи ризик ерозії й руйнування міжтубулярного матриксу. У разі потреби пролонгованої антимікробної дії може застосовуватись хлоргексидин, але лише після повної елімінації залишків NaOCl .

Апікальна третина кореневого каналу потребує максимально делікатного втручання через мінімальну товщину стінок і високий ризик екструзії. У цій зоні рекомендовано обмежувати дію класичних хелаторів (EDTA), натомість перевагу слід надавати Continuous Chelation ($\text{NaOCl} + \text{НЕВР}$), яка має м'яку демінералізуючу дію і не спричиняє різкого вилугування кальцію. На цьому рівні гіпохлорит у середній або високій концентрації доцільно активувати за допомогою систем негативного тиску (EndoVac), що забезпечують ламінарний відтік і контрольований розподіл розчину без виходу за апекс. Застосування PUI в апікальній ділянці має бути мінімальним за часом і потужністю для уникнення перегріву та вторинних мікротріщин.

Завершальний етап іригації може включати короткий цикл EDTA лише у випадках необхідності додаткового очищення устя каналців, проте при використанні НЕВР ця потреба часто відсутня. Після завершення циклу обов'язковим є промивання фізі-

ологічним розчином або дистильованою водою для запобігання хімічним реакціям між NaOCl та CHX . Результативність сучасних протоколів визначається не тривалістю контакту, а керованістю потоку, частотою оновлення іригантів та ефективною енергетичною активацією, що забезпечує збереження мікроструктури дентину й довготривалу стабільність адгезії.

Висновки. Дослідження підтвердило, що морфологічна неоднорідність дентину різних анатомічних зон визначає специфіку реакції на іригаційні агенти, зокрема ступінь демінералізації, зміну мікротвердості та проникності. Доведено, що ефективність очищення і дезінфекції корневих каналів залежить не лише від складу іригаційного розчину, а й від способу його активації та хімічної послідовності застосування. Встановлено, що традиційна комбінація гіпохлориту натрію та етилендіамінтетраоцтової кислоти забезпечує високу ефективність видалення змазаного шару, однак у разі тривалого застосування EDTA зростає ризик деградації колагену та появи ерозійних дефектів. Аналіз сучасних протоколів демонструє переваги методики Continuous Chelation, у межах якої поєднання NaOCl та етидроновної кислоти (НЕВР) забезпечує м'яке, контрольоване хелатування, підтримує стабільну проникність дентину та знижує ризик втрати мікротвердості, особливо в апікальній третині.

З'ясовано, що концентрації NaOCl понад 5 % можуть спричинити зниження мікротвердості дентину у разі тривалого контакту без контролю температури, а неконтрольована ультразвукова активація підсилює ерозійні процеси через локальний перегрів. Рекомендовано застосовувати анатомічно диференційовані протоколи іригації: у коронковій та середній частинах – активований NaOCl у поєднанні з EDTA або НЕВР; в апікальній – низькотравматичні системи, зокрема негативний тиск або мультіакустичну активацію, у поєднанні з Continuous Chelation. Завершальне промивання нейтральним буфером забезпечує хімічну стабільність поверхні дентину перед обтурацією. Перспективи подальших досліджень передбачають оптимізацію енергетичних методів активації та розроблення нових варіантів біосумісних іригаційних систем із контрольованим профілем хелатувальної дії.

REFERENCES

1. Rozhko MM, Novosiadlyi RI, Kostyshyn ZT, Popovych ZB, Dmytryshyn TM. Vplyv khimichnykh iryhtantiv na stan bioplivku korenevoho kanalu pry likuvanni periodontyiv (ohliad literatury). *Terapevtyka im. prof. Berezhnyskoho MM*. 2023;4(4):36–39. <https://doi.org/10.31793/2709-7404.2023.4-4.36>
2. Potapchuk AM, Almashi VM, Rak YuV, Melnyk YuO, Buleza VV, Horzov AP. Porivnialnyi analiz efektyvnosti suchasnykh metodiv aktyvatsii iryhtantiv u protokoli khemo-mekhanichnoi obrobky systemy korenevoho kanalu (ohliad literatury). *Suchasna stomatolohiia*. 2023;(3):4. <https://doi.org/10.33295/1992-576X-2023-3-4>
3. Heranin S. Naslidky vyvedennia plombuvalnoho materialu za verkhivku v endodontychnii praktytsi. Reaktsiia periradykuliarnykh tkanyn ta mozhylyvi uskladnennia. *Kharkivskyi stomatolohichnyi zhurnal*. 2024;1(1):48–64. <https://doi.org/10.26565/3083-5607-2024-1-06>
4. Hadzhula NH, Kostiuchyk AV. Analiz klinichnoi praktyky likariv-stomatolohiv shchodo iryhatsii korenevnykh kanaliv na etapakh endodontychnoho likuvannia: rezultaty anketuvannia. *Visnyk Vinnytskoho natsionalnoho medychnoho universytetu*. 2025;29(3):514–520. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2025-29\(3\)-25](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2025-29(3)-25)
5. Marques JA, Falacho RI, Santos JM, Ramos JC, Palma PJ. Effects of endodontic irrigation solutions on structural, chemical, and mechanical properties of coronal dentin: A scoping review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2024;36(4):606–619. <https://doi.org/10.1111/jerd.13135>
6. Rath PP, Yiu CKY, Matinlinna JP, Kishen A, Neelakantan P. The effect of root canal irrigants on dentin: a focused review. *Restorative Dentistry & Endodontics*. 2020;45(3):e39. <https://doi.org/10.5395/rde.2020.45.e39>

-
7. Agarwal S, Mishra L, Singh NR, Behera R, Kumar M, Nagaraja R, et al. Effect of different irrigating solutions on root canal dentin microhardness—A systematic review with meta-analysis. *Journal of Functional Biomaterials*. 2024;15(5):132. <https://doi.org/10.3390/jfb15050132>
 8. Baruwa AO, Martins JN, Maravic T, Mazzitelli C, Mazzoni A, Ginjeira A. Effect of endodontic irrigating solutions on radicular dentine structure and matrix metalloproteinases—a comprehensive review. *Dentistry Journal*. 2022;10(12):219. <https://doi.org/10.3390/dj10120219>
 9. Padmakumar I, Hinduja D, Mujeeb A, Kachenahalli Narasimhaiah R, Kumar Saraswathi A, Mirza MB, et al. Evaluation of effects of various irrigating solutions on chemical structure of root canal dentin using FTIR, SEM, and EDS: an in vitro study. *Journal of Functional Biomaterials*. 2022;13(4):197. <https://doi.org/10.3390/jfb13040197>
 10. Martinho JP, França S, Paulo S, Paula AB, Coelho AS, Abrantes AM, et al. Effect of different irrigation solutions on the diffusion of MTA cement into the root canal dentin. *Materials*. 2020;13(23):5472. <https://doi.org/10.3390/ma13235472>
 11. Tavares S, Pintor A, Mourão CFDAB, Magno M, Montemezzi P, Sacco R, et al. Effect of different root canal irrigant solutions on the release of dentin-growth factors: A systematic review and meta-analysis. *Materials*. 2021;14(19):5829. <https://doi.org/10.3390/ma14195829>
 12. Shi L, Wan J, Yang Y, Yao Y, Yang R, Xie W. Evolution of the combined effect of different irrigation solutions and activation techniques on the removal of smear layer and dentin microhardness in oval-shaped root canal: An in vitro study. *Biomolecules and Biomedicine*. 2023;23(1):126. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2022.7440>
 13. AlBatati M, AbuMostafa A. The effect of final irrigation with different solutions on smear layer removal and dentin erosion: A scanning electron microscope study. *PLoS One*. 2024;19(8):e0308606. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308606>
 14. Barcellos DPDC, Farina AP, Barcellos R, Souza MA, Borba M, Bedran-Russo AK, et al. Effect of a new irrigant solution containing glycolic acid on smear layer removal and chemical/mechanical properties of dentin. *Scientific Reports*. 2020;10(1):7313. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64450-1>
 15. Reyes-Carmona J. Irrigation protocols effects on radicular dentin: Cleaning, disinfection and remaining ultrastructure. *Odovtos International Journal of Dental Sciences*. 2023;25(1):14–21. <http://dx.doi.org/10.15517/ijds.2022.51869>

Дата надходження статті: 17.10.2025

Дата прийняття статті: 28.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025