

*Потанчук А.М., Алмаші В.М., Рак Ю.В., Мельник Ю.О.,**Булеза В.В., Горзов А.П.*

Порівняльний аналіз ефективності сучасних методів активації іригантів у протоколі хемо-механічної обробки системи кореневого каналу (огляд літератури)

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Резюме. Розвиток апікального періодонтиту є найпоширенішим ускладненням невдало проведеного ендодонтичного лікування. Очищення системи кореневого каналу є ключовим етапом та основним фактором успішного ендодонтичного протоколу. Неможливість видалення дебрису з важкодоступних розгалужень системи кореневого каналу, особливо з апікальної частини, зумовлює та підвищує ризик розвитку його вторинного інфікування. Вибір оптимального методу активації іригантів залишається актуальним питанням сьогодення. За результатами низки досліджень жодна із окремо взятих технік активації іригантів не дозволяє досягнути ідеальної чистоти в кореновому каналі, але застосування лазерної, сонічної, мультисонічної та ультразвукової активації іригаційного розчину значно підвищує якість очищення та забезпечує пролонгований антимікробний ефект, шляхом посилення дифузії внутрішньоканальних антисептиків, їх гідролітичної та антибактеріальної ефективності, що в майбутньому забезпечить максимальну адгезію пломбувальних матеріалів. Це в свою чергу вказує на відсутність уніфікованого протоколу, який би давав стабільну ефективність іригації та пролонговані результати ендодонтичного лікування зубів. Застосування протоколу з комбінованою активацією іригантів залишається актуальною темою середклініцистів та науковців.

Ключові слова: ендодонтія, активація, іригація, кореневий канал, гіпохлорит натрію, змазаний шар, дебрис, ультразвук, звукова активація, лазер, Gentlewave, SAF (Self-AdjustingFile), XP-EndoFinisher.

Активація іригантів – один із ключових етапів медикаментозної обробки кореневих каналів, який полягає в досягненні розчином всіх ділянок кореневого каналу та збільшення його антимікробної активності. Тому, задля збільшення ефективності іригантів, були розроблені різні методи їх активації.

Гіпохлорит натрію є найчастіше використовуваним іригантом [1], що є не безпідставним через його виняткову антимікробну дію по відношенню до мікроорганізмів біоплівки [2] та

здатність до розчинення компонентів біоплівки та пульпової тканини [3]. Хімічний ефект забезпечується вмістом вільного хлору, що є складником гіпохлориту (OCl^-) та хлорноватистої кислоти (HOCl). Обидва є сильними окисниками, активність котрих залежить від рН. Звичайний розчин NaOCl має рН близький до 11–12 [4]. Досі не досягнуто консенсусу на рахунок оптимальної концентрації гіпохлориту натрію, що зазвичай варіюється від 0,5 до 8,25% [5]. Виходячи з лабораторних досліджень, бажаний ефект

гіпохлориту натрію забезпечується його концентрацією [6]. Хоч і останні клінічні дослідження не виявили значну різницю у антимікробному ефекті або ж у загоєнні апікального періодонтиту між різними концентраціями гіпохлориту натрію [7], але результати можуть бути спотвореними через відсутність належної рандомізації, різноманіття інструментарію та іригаційного протоколу, 2D-аналіз, тобто тільки з використанням рентгенограм, недостатнім розміром вибірки [8]. Підвищення концентрації також веде до небажаних ефектів, а саме розчин реагує з колагеном у дентинних каналцях, особливо після експозиції з хелатуючим агентом, що може робити вплив на модуль пружності, міцність на розтяг та згин та мікротвердість дентину [9]. Також NaOCl є дуже їдким, навіть невелика екструзія його у периапікальні тканини може призвести до гіпохлоритової аварії [10]. Нагрівання гіпохлориту до 50–60°C є одним із методів компенсації ефективності розчину за нижчої концентрації, хоч ця гіпотеза була спростована дослідженнями *in vitro* та *ex vivo* [11], що показують температура швидко падає до 37°C після інтраканального введення [12]. Хлоргексидинуглюконат (СНХ) є катіонним бісбігуанідом, що зазвичай використовується як фінальний іригант [13] через недостатність ефекту розчинення тканин, що обмежує його застосування як основного іриганту. Думка про високу активність на рівні з гіпохлоритом натрію була помилковою через тестування на *E. faecalis*, що є особливо сприйнятливим до хлоргексидину, і не є присутнім у багатьох випадках проваленого ендодонтичного лікування, або ж за його присутності – не є переважним [14].

Також, важливим є застосування хелатуючих розчинів задля видалення змазаного шару. У ролі такого іриганту застосовується етилендіамінтетраоцтова кислота (ЕДТА). Дана речовина має слабколужний рН (~7–8), має сильний хелатуючий ефект, завдяки якому має можливість розчиняти дебрис та змазаний шар за використання наприкінці інструментації, проте антимікробні властивості – слабкі, хоч і ЕДТА порушує матрицю біоплівки, тим самим сприяючи її відшаруванню [15]. Альтернативою ЕДТА є лимонна та малеїнова кислоти [16–17]. Обидві є біосумісними,

проте реагують із гіпохлоритом натрію залучаючи вільний хлор. Антимікробний ефект – слабкий, хоч малеїнова кислота здатна руйнувати бактерії біоплівки [18].

Отже, варто розглянути можливі методи активації гіпохлориту натрію:

- **Мануальна активація**, розділяють на доставку іригантів зі шприца та мануальну динамічну активацію. Існує велика варіативність за розміром, матеріалами, відкриттям отвору, кількістю отворів, гнучкості. Серед них голки зроблені з нержавіючої сталі, нікель-титану, а також пластику, що підвищує здатність іригації, особливо у зігнутих каналах. Рекомендується використання голок із малим діаметром, що варіюється від 27G до 31G [19]. Проте існує проблема з голками малого діаметру (<30G). Вона полягає у тому, що потрібно додавати більшу силу на поршень задля правильного затікання іриганту. Отже, для забезпечення дієвості даного методу необхідно довести голку на всю робочу довжину, великий об'єм іриганту, повільна його доставка, малий розмір голки (<30G). Тим не менш, за цього методу були виявлені ділянки, наповнені бактеріями та дебрисом.

Доставка іригантів зі шприца – найлегший та найдоступніший метод, також відомий як метод позитивного тиску, тому що той утворюється у каналі через натискання на поршень шприца. Мануальна динамічна активація (MDA) – метод, що базується на вертикальних рухах іригаційної голки або ж гутаперчевого штифта і може сприяти проникненню іриганту на робочу довжину завдяки створенню гідродинамічного ефекту. Даний ефект може бути досягнутий виконуючи вертикальні рухи гутаперчевим штифтом. Практичні дослідження, у свою чергу, кладуть під сумнів ефективність даного методу активації через низьку ефективність очищення згинів, плавників, дельтовидних розгалужень кореневого каналу [20]. Тому, на протипагу своїй доступності, даний метод – найменш ефективний.

- **Безперервна іригація під час інструментації** (Self-AdjustFile (SAF), ReDentNova, Ra'anana, Israel) – являє собою файл у вигляді порожнистої трубки, стінки якої – тонка нікель-титанова

сітка з шорсткою поверхнею. Таким чином, забезпечується мінімальне видалення дентину при застосуванні вібраційних рухів схожих на зішкрябування, що підтримує мінімальну інвазивність при виконанні втручання. Іригаційний розчин доставляється крізь файлову систему протягом всього процесу очистки та формування кореневого каналу. Це досягається завдяки використанню файлу з двома різними системами, котрими є VATEA IrrigationPump та All-in-one-EndostationMachine [21]. SAF не дозволяє контролювати апікальне розширення, таким чином, обмежується можливість іригантів досягнути ефективної та передбачуваної дезінфекції.

- **Активация з застосуванням ротаційних інструментів.** Для даного методу застосовуються файли зі сплаву MaxWire (FKGDentaire, LaChaux-de-Fonds, Switzerland) представником яких є XP-EndoFinisher, який зроблений із високонгнучкого MaxWire і може діяти у двох фазах: аустенітній та мартенситній; має нульову конусність з розміром кінчика 25 за стандартом ISO. Він має більшу здатність до просторового розширення у порівнянні з XP-EndoShaper і може досягати до 6 мм у діаметрі. Крім того, досягає не оброблених частин усередині кореневого каналу без супутнього препарування дентину та зміни вже отриманої форми кореневого каналу. Останні дослідження вказують, що XP-EndoFinisher, з використанням звичного іригаційного протоколу, не вдається зробити апікальну частину вільною від дебрису [22]. Проте, проведений аналіз досліджень – свідчить, що переваг застосування XP-EndoFinisher з точки зору впливу на бактеріальну складову кореневого каналу – немає [23].
- **Машинно-покращена іригація** базується на використанні брашів у поєднанні з кутовим наконечником, що сприяє швидкому перемішуванню іриганту і власне, його активації. Даний метод активації досягає недоступні зони у корневих каналах і має краще видалення тканин та дебрису у порівнянні зі звичайною інструментацією без будь-якої активації. Проте, є залежність між розміром щіточки та можливістю досягнути нею робочої довжини, а також ризик пресування дебрису, особливо, в апікальній частині кореневого

каналу. Також дослідження вказують на високу ефективність даного методу активації у видаленні змазаного шару [24].

- **Ультразвукова активація** – метод активації іриганту, що базується на застосуванні ультразвукових коливань у діапазоні 25–32 кГц. Дана техніка покращує хімічну очистку завдяки формуванню циркулюючих акустичних мікропотоків, рух іриганту навколо вібруючого файлу, а також утворенню акустичної кавітації, що сприяє утворенню та потоку бульбашок. Така потужність сприяє затіканню іриганту у віддалені зони системи корневих каналів [25]. Найкраще працює даний метод, коли інструмент працює вільно у межах каналу та не доторкається його стінок. Загалом два принципи використання ультразвуку є дослідженими. Перший – ультразвукова інструментація, що є певним комбінуванням етапів іригації та інструментації. Проте, цей метод є абсолютно неактуальним через неможливість правильного контролю препарування ультразвуковими файлами дентину кореневого каналу, що призводить до зміни вихідної форми каналу, а також підвищення ризику стрічкових перфорацій. Другий принцип – пасивна ультразвукова активація, що базується на активації іриганту за допомогою ультразвуку без одночасної інструментації, хоч і даний термін можна вважати застарілим, бо в основі пасивної активації – лежали уявлення про вільне знаходження інструменту в каналі, без жодного контакту з дентином [26].

Власне пасивну ультразвукову активацію можна поділити на два типи: постійна пасивна ультразвукова активація – передбачує постійний потік іриганту крізь інструмент, яким здійснюється активація. Така активація здійснюється завдяки пристрою Nusstein'a, що утримує голку розміром 25G на ультразвуковому наконечнику, що сприяє потоку іриганта у канал під час активації. Дослідження *invivo* показують високу ефективність в очистці каналів та істмусів для вітальних та девітальних випадків за однаковий час, а також зменшення кількості колонієформуючих мікроорганізмів у девітальних зубах [27]. Такі результати забезпечуються завдяки постійному потоку

свіжого іриганту. Проте, через постійний потік, зменшує час активації ультразвуком. Іншим варіантом є ультразвукові голки (Pro Ultra Piezo Flow від DentsplySirona, Charlotte, NC), що може бути використаним як з ультразвуковими наконечниками, так і з шприцами. Проте виробник рекомендує застосування тільки у зубах зі сформованими верхівками через можливість екструзії іриганту у периапікальні тканини [28].

Переривчаста пасивна ультразвукова – в основі лежить активація ультразвуковим файлом із нержавіючої сталі або ж нікель титану. Важливим, у даному випадку, є підбір файлу з гладкими гранями задля попередження неконтрольованого видалення дентину, хоч і повної відсутності супутнього препарування – неможливо [29]. Деякі інструменти мають дизайн К-файлу з квадратним перерізом, що формує гострі ріжучі грані протягом файлу. Такий тип показує зниження амплітуди коливань від кінчика до прикріпленої частини. Також, можна виділити інструмент від компанії ActeonSatelec, Merignac, під назвою «IrriSafe». Його особливість полягає у неріжучих гранях з великим кроком різби, відсутністю конусності та тупому неактивному кінчику. Загалом, за успішністю ультразвукової активації стоять два фактори: перший – потужність ультразвукових коливань – спричиняє де агрегацію біоплівки завдяки акустичним мікропотокам; другий – кавітація, що ослаблює клітинну стінку бактерій. Дія даних факторів покращується за присутності гіпохлориту натрію з його антибактеріальним ефектом. За даної техніки відбувається передача коливань від файлу до іриганту всередині кореневого каналу для формування акустичного потоку та кавітації розчину. Для інструменту повинно бути достатньо місця для його безперешкодних коливань, тому активація має місце тільки після попередньої хемомеханічної обробки, найкраще демонструється очистка за коливань близько 50–80µm та при апікальному розширенні до розміру 30–35 за ISO [25].

Проте найголовнішим недоліком ультразвукової активації є гірша робота у ділянках згинів кореневих каналів, через входження інстру-

менту у резонанс із стінкою кореневого каналу з наступною відсутністю активації у цій ділянці.

- **Звукова (сонічна) активація** має в основі звукові коливання у діапазоні 1000–6000Гц для перемішування іриганту. Дослідження не змогли довести переваги Endoactivator (Dentsply Sirona, Charlotte, NC) у очищенні каналів, перешийків, плавників над іригацією шприцем [30]. Також Endoactivator був менш ефективним при однаковому часі іригації у порівнянні з ультразвуковою активацією. На противагу, EDDY (VDW, Munich, Germany) демонструє ефективність очистки на рівні ультразвукової активації [31]. У той же час, інші дослідження свідчать про однакову ефективність EDDY та іригації шприцем в антибактеріальному аспекті [32] та виведенні дебрису з перешийків [33]. Спричиняється це великим розміром самого інструменту і, коли він входить до каналу, більшість розчину витісняється назовні, а надмірна потужність не дає можливість витримати мінімальну експозицію іриганту. У порівнянні звукового та ультразвукового методу активації, дослідження показують кращий ефект ультразвукового способу в аспекті видалення залишків пульпи, хоч і звукові засоби працюють краще на всіх відрізках каналу, тобто у місцях за згином, де гірше працюють ультразвукові способи активації.
- **Техніка подачі апікального негативного тиску** реалізовується системою EndoVac. Система включає в себе наконечник, макроканюлю та мікроканюлю. Наконечник доставляє іригант у камеру пульпи та забирає надлишки. Макроканюля відсмоктує іригант до середнього сегменту каналу. Мікроканюля розташовується на відстані 0,2мм від апекса, щоб покращити доставку іриганту до апікальної частини шляхом створення негативного тиску через мікропори для забезпечення ретельного очищення [34]. Ця техніка видаляє повітря, тобто, відомий феномен Vapour-lock, що застрягає в апікальному сегменті кореневого каналу, коли повітря застрягає внаслідок введення рідини в закритий мікроканал, наприклад кореневий канал, і заважає прямому контакту апікальної частини каналу з розчином іриганту, але протягом декількох годин і днів канал

буде заповнений іригантом. Однак, це не реалізується, через обмежений часовий проміжок протягом ендодонтичного лікування. Техніка апікального негативного тиску вимагає надмірного апікального розширення до розміру 40 для вільного введення канюлі на всю довжину, що може бути неможливим в корневих каналах зі згинами [35].

В порівнянні зі звичайною методикою активації шприцом апікальний негативний тиск показує кращу ефективність у зменшенні числа бактерій, запального інфільтрату, але значна розбіжність результатів у статтях свідчить про статистично незначну перевагу [36].

Система Rinsendo (DürrDentalSe, Höpfigheimer, Bietigheim-Bissingen, Germany) – альтернативний пристрій, принцип роботи якого базується на всмоктуванні тиску. Працює завдяки гідродинамічній активації іриганту та надтонкій гнучкій канюлі, яку розташовують у апікальній третині задля забезпечення іригації негативним тиском. За роботи пристрою відбувається доставка іриганту об'ємом 6,2 мл за хвилину використовуючи тиск 0,34474 бар для його доставки, загалом відбувається 100 циклів тиску/всмоктування за хвилину, що покращує проникнення іриганту. Проте, таке пульсування підвищує ризик екструзії апікальної екструзії іриганту [37]. Також, дослідження *in vitro* показують менше видалення колагену з корневих каналів у порівнянні до мануальної динамічної активації гутаперчевим штафтом. Дослідження не доводять будь-яких переваг даного способу у хімічній очистці та прогнозі лікування [38].

Лазерна активація базується на оптичній кавітації за рахунок створення та руйнування (створення мікро-вибухів) бульбашок, що стимулює проникнення такого іриганту вглиб каналу з подальшим нагріванням та активацією розчину [39]. Таку ефективність забезпечує фотонний фотоакустичний потік (PIPS), що має наконечник, котрий занурюється в іригант у пульсовій камері, при цьому витрачається дуже мала кількість енергії та незначне підвищення температури твердих тканин зуба. Це дає можливість ефективно активувати іригант на всьому протязі кореневого каналу, в тому

числі в ділянці згинів без небажаного препарування стінок [40]. Доведено, що лазерна активація руйнує *Candida albicans* та високорезистентний *E. faecalis* в доповнення до розчинення змазаного шару та дентин них дебрисів [41]. Деякі дослідження стверджують, що цей метод є ефективнішим, ніж ультразвукова активація, особливо в ділянці згинів корневих каналів [42]. В протипагу є дослідження, що статистично нівелюють ефективність іригаційних активаторів [43].

Застосування лазерів у стоматології та встановлення факту лазерної бактерицидної дії відкривають нові можливості: як альтернативний метод в подоланні проблем недостатньої глибини проникнення дезінфікуючих агентів в мікроканальці, оскільки глибина проходження лазерного випромінювання в структуру дентину сягає 1000мкм і навіть більше. При певній неоднозначності висновків і рекомендацій різних авторів стосовно спектральних, часових і енергетичних режимів, основним стримуючим фактором для впровадження в клінічну практику методу лазерної дезінфекції є необхідність вибору порогової густини енергії лазера, що забезпечує напруженість електромагнітного поля в дентині, достатню для бактерицидної дії та допустиме термічне навантаження лазерного впливу на періапикальні тканини [44]. Дезінфікуючу дію в основному каналі мають усі лазери, однак здатні здійснити бактерицидну “промивку” припульпарного дентину на глибину не менше 1мм при задовільному температурному навантаженні на періапикальні тканини, лише лазери з довжиною хвилі генерації у ближній інфрачервоній області спектру, в даному випадку 0,810мкм (діодний) та 1,06мкм (Nd:YAG) лазери.

З метою покращення обробки поверхні стінки макроканалу було випробувано нові оптичні волокна з конічним закінченням, що дозволяють радіально спрямовувати лазерний промінь строго на стінку макроканалу. Результати морфологічних досліджень з допомогою електронної скандувальної мікроскопії вказують на те, що ефективність рівномірної обробки стінки каналу по всій довжині з використанням світловодного наконечника радіального типу не підлягає сумніву. Проблема дезінфекції мікросистеми

каналу кореня зуба вирішена експериментальним обґрунтуванням режимів лазерної трансканальної обробки дентину в контексті його світловодних властивостей, нанотехнології з використанням наночастинок срібла, як бактерицидного агента пролонгованої дії та комплексного нанолазерного впливу для успішного ендодонтичного лікування пацієнтів. У режимі лазерної активації наночастинок та наноконструкцій, введених у систему кореневих каналів, досягається ефект нанопротолізу та підсилення ефекту фотокаталітичного окислення, в умовах поверхневого плазмонного резонансу наночастинок золота, що призводить до підсилення бактерицидної дії металічних наночастинок та наноконструкцій Au:TiO₂ [44].

Сучасне наукове підґрунтя і вже існуючі матеріальні засоби дозволяють реалізувати методи нанолазерної дезінфекції не тільки системи мікроканалів кореня, а й мікротубулярну систему інфікованого припульпарного дентину. Просторова структура дентину, кристалічна будова й орієнтація дентинних мікроканалів зумовлює анізотропні властивості дентину, які проявляються в тому числі й у світловодних властивостях у видимій та у ближній інфрачервоній області спектру, де довжина хвилі випромінювання співмірна з розмірами дентинних мікроканалів (0,5–2,0 мкм). Цей факт є визначальним у виборі спектрального режиму лазера для ефективної дезінфекції.

Лазерна активація є ефективним способом активації діючої речовини, та водночас не є гарантом досконало виконаної іригації кореневої системи. Застосування даного методу, як і описаних вище, базується на клінічному випадку, саме тому потребує подальшої перевірки, вивчення і компетентності лікаря для досягнення необхідного результату.

- **Мультисонічна активація** – є найсучаснішим методом у хімічній очистці кореневих каналів. Він базується на створенні мікроскопічних бульбашок, що утворюються акустичними хвилями на різних частотах, задля покращення затікання іриганту до найменших просторів кореневої системи та всередину дентинних каналів та посилення хімічної дії іриганта [45]. GentleWave (Sonendo,

Laguna Hills, CA) це пристрій, що забезпечує даний метод іригації. Він доставляє потік медикamentозних розчинів, включаючи ЕДТА, гіпохлорит натрію, дистильовану воду, з наконечника у пульпову камеру, при цьому надлишок рідини одночасно видаляється за допомогою другого складника системи, котрий відповідає за відведення цієї самої рідини. Дослідження вказують, що за використання GentleWave успішність ендодонтичного втручання у вітальних зубах та в зубах із апікальним періодонтитом – становить 97% [46]. Ця техніка забезпечує мінімальну інструментацію кореневого каналу, так як наконечник вноситься в пульпову камеру, без входження у канали [47]. Тому розширення каналу до розміру від 15 до 25 за ISO є достатнім. В той час, коли для ультразвукової активації необхідне розширення від 30–35 для введення активатора 2–3 мм від апікального отвору [48]. Однак досі немає консенсусу на рахунок меншого розширення каналів задля попередження переломів кореня [49]. Мультисонічна активація зменшує час роботи в системі кореневих каналів, притому забезпечує ефективну іригацію, однак висока вартість системи обмежує її масове застосування [50].

Висновки

За результатами низки досліджень активація іригантів забезпечує пролонгований антимікробний ефект, шляхом посилення дифузії внутрішньоканальних антисептиків, їх гідролітичної та антибактеріальної ефективності, що сприяє прогнозованості ендодонтичного лікування. Порівнюючи ефективність різних методів активації розчинів іригації, привертає увагу клінічно підтверджена ефективність мультисонічної та лазерної активацій, яка змінює уявлення про ендодонтичне лікування, значно зменшуючи необхідне розширення кореневого каналу для адекватної іригації. Однак висока вартість систем обмежує їх масове застосування. За результатами низки досліджень жодна із окремо взятих технік активації іригантів не дозволяє досягнути ідеальної чистоти в кореновому каналі. Це в свою чергу вказує на відсутність уніфікованого протоколу, який би давав стабільну ефективність іригації та пролонговані результати ендодонтичного лікування зубів.

ПОСИЛАННЯ

1. Dutner, J., Mines, P. & Anderson, A. (2012) Irrigation trends among American Association of Endodontists members: a webbased survey. *Journal of Endodontics*, 38, 37–40.
2. Ruiz Linares, M., Aguado Pérez, B., Baca, P., Arias Moliz, M.T. & Ferrer-L uque, C.M. (2017) Efficacy of antimicrobial solutions against polymicrobial root canal biofilm. *International Endodontic Journal*, 50, 77–83.
3. Busanello, F.H., Petridis, X., So, M.V.R., Dijkstra, R.J.B., Sharma, P.K. & van der Sluis, L.W.M. (2019) Chemical biofilm removal capacity of endodontic irrigants as a function of biofilm structure: optical coherence tomography, confocal microscopy and viscoelasticity determination as integrated assessment tools. *International Endodontic Journal*, 52, 461–474.
4. Jungbluth, H., Marending, M., De Deus, G., Sener, B. & Zehnder, M. (2011) Stabilizing sodium hypochlorite at a high pH: effect on soft tissue and dentin. *Journal of Endodontics*, 37, 693–696.
5. Demenech, L.S., de Freitas, J.V., Tomazinho, F.S.F., Baratto Filho, F. & Gabardo, M.C.L. (2021) Postoperative pain after endodontic treatment under irrigation with 8.25% sodium hypochlorite and other solutions: a randomized clinical trial. *Journal of Endodontics*, 47, 696–704.
6. Chau, N.P.T., Chung, N.H. & Jeon, J.G. (2015) Relationships between the antibacterial activity of sodium hypochlorite and treatment time and biofilm age in early *Enterococcus faecalis* biofilms. *International Endodontic Journal*, 48, 782–789.
7. Ulin, C., Magunacelaya Barria, M., Dahlén, G. & Kvist, T. (2020) Immediate clinical and microbiological evaluation of the effectiveness of 0.5% versus 3% sodium hypochlorite in root canal treatment: A quasi randomized controlled trial. *International Endodontic Journal*, 53, 591–603.
8. Verma, N., Sangwan, P., Tewari, S. & Duhan, J. (2019) Effect of different concentrations of sodium hypochlorite on outcome of primary root canal treatment: a randomized controlled trial. *Journal of Endodontics*, 45, 357–363.
9. Pascon, F.M., Kantovitz, K.R., Sacramento, P.A., Nobre dos Santos, M. & Puppim Rontani, R.M. (2009) Effect of sodium hypochlorite on dentine mechanical properties. A review. *Journal of Dentistry*, 37, 903–908.
10. Guivarc'h, M., Ordioni, U., Ahmed, H.M., Cohen, S., Catherine, J.H. & Bukiet, F. (2017) Sodium hypochlorite accident: a systematic review. *Journal of Endodontics*, 43, 16–24.
11. Dumitriu, D. & Dobre, T. (2015) Effects of temperature and hypochlorite concentration on the rate of collagen dissolution. *Journal of Endodontics*, 41, 903–906.
12. de Hemptinne, F., Slaus, G., Vandendael, M., Jacquet, W., De Moor, R.J. & Bottenberg, P. (2015) In vivo intracanal temperature evolution during endodontic treatment after the injection of room temperature or preheated sodium hypochlorite. *Journal of Endodontics*, 41, 1112–1115.
13. Haapasalo, M., Qian, W. & Shen, Y. (2012) Irrigation: beyond the smear layer. *Endodontic Topics*, 27, 35–53.
14. Siqueira, J.F., Antunes, H.S., Røed, I.N., Rachid, C.T. & Alves, F.R. (2016) Microbiome in the apical root canal system of teeth with post-treatment apical periodontitis. *PLoS One*, 11, e0162887.
15. Busanello, F.H., Petridis, X., So, M.V.R., Dijkstra, R.J.B., Sharma, P.K. & van der Sluis, L.W.M. (2019) Chemical biofilm removal capacity of endodontic irrigants as a function of biofilm structure: optical coherence tomography, confocal microscopy and viscoelasticity determination as integrated assessment tools. *International Endodontic Journal*, 52, 461–474.
16. Prado, M., Gusman, H., Gomes, B.P.F.A. & Simro, R.A. (2011) Scanning electron microscopic investigation of the effectiveness of phosphoric acid in smear layer removal when compared with EDTA and citric acid. *Journal of Endodontics*, 37, 255–258.
17. Ballal, N.V., Jain, I. & Tay, F.R. (2016) Evaluation of the smear layer removal and decalcification effect of QMix, maleic acid and EDTA on root canal dentine. *Journal of Dentistry*, 51, 62–68.
18. Ferrer-L uque, C.M., Arias Moliz, M.T., González Rodríguez, M.P. & Baca, P. (2010) Antimicrobial activity of maleic acid and combinations of cetrimide with chelating agents against *Enterococcus faecalis* biofilm. *Journal of Endodontics*, 36, 1673–1675.
19. Bronnec F, Bouillaguet S, Machtou P: Ex vivo assessment of irrigant penetration and renewal during the final irrigation regimen. *Int Endod J*. 2010; 43:663-72. 10.1111/j.1365-2591.2010.01723.x
20. Sydorak, K. T. (2018). The efficiency of cleaning the system of corner channels with different protocols of irrigation. *Bulletin of Scientific Research*, (4). <https://doi.org/10.11603/2415-8798.2017.4.8360>
21. Metzger Z: The self-adjusting file (SAF) system: an evidence-based update. *J Conserv Dent*. 2014, 17: 401-19. 10.4103/0972-0707.139820
22. Alakshar A, Saleh AR, Gorduysus MO: Debris and smear layer removal from oval root canals comparing XPendo finisher, endoactivator, and manual irrigation: a SEM evaluation. *Eur J Dent*. 2020, 14:626-33. 10.1055/s-0040-1714762

23. Oliveira LSJ, de Braganza RMF, Sarkis-Onofre R, Faria-E-Silva AL. The effectiveness of the supplementary use of the XP-endo Finisher on bacteria content reduction: a systematic review and meta-analysis. *Restor Dent Endod*. 2021 Jun 18;46(3): e37. doi: 10.5395/rde.2021.46. e37. PMID: 34513643; PMCID: PMC8411000.
24. Ismail PMS, AIMogbel AM, Priya R, Bansal N, Mattigatti S, Nara A, AIMutairi FJ. An in vitro comparative assessment of manual hand file, rotary protaper-ni-ti, erbium:yttrium-aluminum-garnet laser, canal brush, and ultrasound methods for smear layer removal. *Ann Afr Med*. 2022 Jul-Sep; 21(3): 244–249. doi: 10.4103/aam.aam_115_20. PMID: 36204910; PMCID: PMC9671173.
25. Retsas A, Boutsoukis C: An update on ultrasonic irrigant activation. *ENDO*. 2019, 13:115–29.
26. Kanaan, C.G., Pelegrine, R.A., daSilveiraBueno, C.E., Shimabuko, D.M., ValamatosPinto, N.M. &Kato, A.S. (2020) Can irrigant agitation lead to the formation of a smear layer? *Journal of Endodontics*, 46, 1120–1124.
27. Tashkandi N, Alghamdi F. Effect of Chemical Debridement and Irrigant Activation on Endodontic Treatment Outcomes: An Updated Overview. *Cureus*. 2022 Jan 23; 14 (1): e21525. doi: 10.7759/cureus.21525. PMID: 35223300; PMCID: PMC8863357
28. Ma J, Shen Y, Yang Y, et al.: In vitro study of calcium hydroxide removal from mandibular molar root canals (<https://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2014.11.023>). *J Endod*. 2015, 41: 553–8. 10.1016/j.joen.2014.11.023 (<https://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2014.11.023>)
29. Retsas A, Koursoumis A, Tzimpoulas N, Boutsoukis C: Uncontrolled removal of dentin during in vitro ultrasonic irrigant activation in curved root canals (<https://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2016.07.006>). *J Endod*. 2016, 42:1545-9. 10.1016/j.joen.2016.07.006 (<https://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2016.07.006>)
30. Duque JA, Duarte MA, Canali LC, Zancan RF, Vivan RR, Bernardes RA, Bramante CM: Comparative effectiveness of new mechanical irrigant agitating devices for debris removal from the canal and isthmus of mesial roots of mandibular molars. *J Endod*. 2017, 43: 326–31. 10.1016/j.joen.2016.10.009
31. Conde AJ, Estevez R, Loroco G, Valencia de Pablo Y, Rossi-Fedele G, Cisneros R: Effect of sonic and ultrasonic activation on organic tissue dissolution from simulated grooves in root canals using sodium hypochlorite and EDTA. *Int Endod J*. 2017, 50:976-82. 10.1111/iej.12717
32. Zeng C, Willison J, Meghil MM, et al.: Antibacterial efficacy of an endodontic sonic-powered irrigation system: an in vitro study. *J Dent*. 2018, 75:105-12. 10.1016/j.jdent.2018.06.003
33. Rüdiger T, Koberg C, Baxter S, Konietzschke F, Wiegand A, Rizk M: Micro-CT evaluation of sonically and ultrasonically activated irrigation on the removal of hard-tissue debris from isthmus-containing mesial root canal systems of mandibular molars. *Int Endod J*. 2019, 52:1173-81. 10.1111/iej.13100
34. Tashkandi N, Alghamdi F. Effect of Chemical Debridement and Irrigant Activation on Endodontic Treatment Outcomes: An Updated Overview. *Cureus*. 2022 Jan 23;14(1):e21525. doi: 10.7759/cureus.21525. PMID: 35223300; PMCID: PMC8863357.
35. Effect of apical preparation size and preparation taper on irrigant volume delivered by using negative pressure irrigation system. Brunson M, Heilborn C, Johnson DJ, Cohenca N. *J Endod*. 2010;36:721–724.
36. Comparison of Debridement Efficacy and Periapical Repair Using Apical Negative Pressure Irrigation Versus Syringe Irrigation a Systematic Review. Alghamdi F, Alamehadi A. *EgyptDent J*. 2019;65:3535–3542.
37. Hauser V, Braun A, Frentzen M: Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *Int Endod J*. 2007, 40:644-52. 10.1111/j.1365–2591.2007. 01264.x
38. McGill S, Gulabivala K, Mordan N, Ng YL: The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (Rins Endo) determined by removal of a collagen 'bio-molecular film' from an ex vivo model. *Int Endod J*. 2008, 41:602-8. 10.1111/j.1365-2591.2008.01408.x
39. Huang Q, Li Z, Lyu P, Zhou X, Fan Y. Current Applications and Future Directions of Lasers in Endodontics: A Narrative Review. *Bioengineering (Basel)*. 2023 Feb 26;10(3):296. doi: 10.3390/bioengineering10030296. PMID: 36978686; PMCID: PMC10044917.
40. Robberecht L, Delattre J, Meire M. Isthmus morphology influences debridement efficacy of activated irrigation: A laboratory study involving biofilm mimicking hydrogel removal and high-speed imaging. *Int Endod J*. 2023 Jan;56(1):118-127. doi: 10.1111/iej.13836. Epub 2022 Oct 17. PMID: 36148855; PMCID: PMC10092478.
41. Badami V, Akarapu S, Kethineni H, Mittapalli SP, Bala KR, Fatima SF. Efficacy of Laser-Activated Irrigation Versus Ultrasonic-Activated Irrigation: A Systematic Review. *Cureus*. 2023 Mar 19;15(3):e36352. doi: 10.7759/cureus.36352. PMID: 37082501; PMCID: PMC10111875.
42. Swimberghe RCD, De Clercq A, De Moor RJG, Meire MA. Efficacy of sonically, ultrasonically and laser-activated irrigation in removing a biofilm-mimicking hydrogel from an isthmus model. *Int Endod J*. 2019 Apr; 52 (4): 515–523. doi: 10.1111/iej.13024. Epub 2018 Oct 29. PMID: 30295328.
43. Hage W, De Moor RJG, Hajj D, Sfeir G, Sarkis DK, Zogheib C. Impact of Different Irrigant Agitation Methods on Bacterial Elimination from Infected Root Canals. *Dent J (Basel)*. 2019 Jun 27;7(3):64. doi: 10.3390/dj7030064. PMID: 31252522; PMCID: PMC6784465.

44. A.M. Potapchuk, V.V. Rusyn, O.Yu. Rivis. Fizioterapevtychni tekhnolohiyi v stomatolohiyi. Navchal'nyyposibnyk. Uzhhorod. 2022. S. 105 – 113. (inUkrainian)
45. Sigurdsson A, Garland RW, Le KT, Rassoulia SA: Healing of periapical lesions after endodontic treatment with the GentleWave procedure: a prospective multicenter clinical study. J Endod. 2018, 44:510-7.10.1016/j.joen.2017.12.004
46. Sigurdsson A, Garland RW, Le KT, Woo SM: 12-month healing rates after endodontic therapy using the novel GentleWave system: a prospective multicenter clinical study. J Endod. 2016, 42:1040-8.10.1016/j.joen.2016.04.017
47. Choi HW, Park SY, Kang MK, Shon WJ. Comparative Analysis of Biofilm Removal Efficacy by Multisonic Ultracleaning System and Passive Ultrasonic Activation. Materials (Basel). 2019 Oct 25; 12 (21):3492. doi: 10.3390/ma12213492. PMID: 31731396; PMCID: PMC6862130.
48. Boutsoukis C, Arias-Moliz MT. Present status and future directions – irrigants and irrigation methods. Int Endod J. 2022 May; 55 Suppl 3 (Suppl 3): 588–612. doi: 10.1111/iej.13739. Epub 2022 Apr 6. PMID: 35338652; PMCID: PMC9321999.
49. Augusto CM, Barbosa AFA, Guimarras CC, Lima CO, Ferreira CM, Sassone LM, Silva EJNL. A laboratory study of the impact of ultraconservative access cavities and minimal root canal tapers on the ability to shape canals in extracted mandibular molars and their fracture resistance. IntEndod J. 2020 Nov;53(11):1516-1529. doi: 10.1111/iej.13369. Epub 2020 Sep 21. PMID: 32683704.
50. Coaguila-Llerena H, Gaeta E, Faria G. Outcomes of the Gentle Wave system on root canal treatment: a narrative review. Restor DentEndod. 2022 Feb 14;47(1): e11. doi: 10.5395/rde.2022.47.e11. PMID: 35284323; PMCID: PMC8891464.

Comparative analysis of the effectiveness of modern irrigants activation techniques in the protocol of chemomechanical root canal system treatment (literature review)

Potapchuk A., Almashi V., Rak Y., Melnyk Y., Buleza V., Horzov A.

Resume. Development of apical periodontitis is the most common complication of unsuccessful endodontic treatment. Cleaning the root canal system is a crucial stage and the main factor for a successful endodontic protocol. Inability to remove debris from inaccessible branches of the root canal system, especially from the apical region, leads to and increases the risk of secondary infection. Selection of the optimal method for activating irrigants remains a current issue. According to the results of several studies, none of the individual irrigation activation techniques allows achieving ideal cleanliness in the root canal, but the use of laser, sonic, multisonic, and ultrasonic activation significantly improves the quality of cleaning and provides a prolonged antimicrobial effect by enhancing the diffusion of intracanal antiseptics, their hydrolytic and antibacterial effectiveness, which will eventually ensure maximum adhesion of filling materials. This, in turn, indicates the absence of a unified protocol that would provide stable irrigation efficiency and long-term results in endodontic treatment. The use of a protocol with combined activation of irrigants remains an open question among clinicians and scientists.

Key words: endodontics, root canal, irrigation, activation, Sodium hypochlorite, smear layer, debris, ultrasonic, sonic activation, laser, Gentlewave, SAF (Self-Adjusting File), XP-Endo Finisher.

Сравнительный анализ эффективности современных методов активации ирригантов в протоколе хемо-механической обработки системы корневого канала (обзор литературы)

Потапчук А.М., Алмаші В. Н., Рак Ю.В., Мельник Ю.О., Булеза В.В., Горзов А.П.

Резюме. Развитие апикального периодонтита является самым распространенным осложнением неудачно проведенного эндодонтического лечения. Очищение системы корневого канала является ключевым этапом и главным фактором успешного эндодонтического протокола. Невозможность удаления дебриса из труднодоступных ответвлений системы корневого канала, особенно из апикальной

части, приводить і підвищує ризик розвитку його вторинного інфікування. Вибір оптимального методу активації ірригантів залишається актуальним питанням на сьогоднішній день. За результатами ряду досліджень ні одна з окремо взятих технік активації ірригантів не дозволяє досягти ідеальної чистоти в корневому каналі, але використання лазерної, сонічної, мультисонічної і ультразвукової активації ірригаційного розчину значно підвищує якість очищення і забезпечує пролонгований антимікробний ефект, шляхом посилення дифузії внутріканальних антисептиків, їх гідролітичної і антибактеріальної ефективності, що в майбутньому забезпечить максимальну адгезію пломбировочних матеріалів. Це в свою чергу вказує на відсутність уніфікованого протоколу, який би давав стабільну ефективність ірригації і пролонговані результати ендодонтичного лікування зубів. Використання протоколу з комбінованою активацією ірригантів залишається актуальною темою серед клініцистів і учених.

Ключові слова: ендодонція, активація, ірригація, корневий канал, гіпохлорит натрію, смазаний шар, дедрис, ультразвук, звукова активація, лазер, Gentlewave, SAF (Self-AdjustingFile), XP-EndoFinisher.

Потарчук Анатолій Мефодійович – доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: anatoliy.potarchuk@uzhnu.edu.ua.

Алмаші Василь Миколайович – старший викладач кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: vasil.almasi@uzhnu.edu.ua

Рак Юрій Володимирович – старший викладач кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: yuriy.rak@uzhnu.edu.ua.

Мельник Юрій Олексійович – асистент кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: yurii.melnyk@uzhnu.edu.ua.

Булєза Віктор Валерійович – лікар – інтерн кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: viktorbuleza@gmail.com.

Горзов Арсеній Петрович – лікар, інтерн кафедри стоматології післядипломної освіти стоматологічного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Україна.

Адреса: 88000, м. Ужгород, вул. Станційна, 60А.

E-mail: a.horzov373@gmail.com.