

Макаркина Мария Алексеевна, студентка,
Московский медицинский университет «Реавиз»

Гинзбург Леон Артемович, студент,
Московский медицинский университет «Реавиз»

Дерябкин Дмитрий Ильич, студент,
Московский медицинский университет «Реавиз»

Шешиков Родион Константинович, студент,
Московский медицинский университет «Реавиз»

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОВОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ИРРИГАНТОВ В СИСТЕМЕ КОРНЕВЫХ КАНАЛОВ

Аннотация. Проблема достижения стерильности системы корневых каналов сохраняет свою актуальность, поскольку традиционная инструментальная обработка оставляет незатронутыми до 50% поверхности дентина. В настоящем обзоре проведён критический анализ механизмов преодоления апикальной «паровой пробки» и элиминации биоплёнок *Enterococcus faecalis* с помощью кавитационных эффектов. На основе 21 источника из баз PubMed, Scopus и eLibrary (1984–2026) систематизированы данные о гидродинамической активности ирригантов. Установлено значимое преимущество пассивной ультразвуковой активации (PUI), обеспечивающей чистоту перешейков в 92% случаев по сравнению с 76% при звуковом воздействии. Благодаря частоте колебаний до 30 кГц ультразвук в 3-4 раза интенсивнее генерирует акустические микротечения, способствующие удалению дентинного дебриса. Однако при выраженной кривизне каналов (более 35°) приоритетной признана звуковая активация гибкими насадками, снижающая риск микротрещин дентина на 18%. Предложены научно обоснованные критерии выбора между звуковыми и ультразвуковыми протоколами в зависимости от морфотипа зуба, позволяющие повысить вероятность успешного первичного лечения до 91% за счёт персонализированного алгоритма дезинфекции.

Ключевые слова: Эндодонтия, ирригация, ультразвуковая активация, звуковая активация, пассивная ультразвуковая ирригация, биопленка.

Введение

Успех эндодонтического лечения определяется качеством трёхмерной очистки, дезинфекции и obturation системы корневых каналов. Как подчёркивает О.А. Peters [1], современные концепции препарирования сталкиваются с непредсказуемостью внутренней анатомии зуба. Традиционная механическая обработка способна очистить лишь центральную часть магистрального канала, оставляя нетронутыми многочисленные перешейки, латеральные ответвления, апикальные дельты и С-образные конфигурации, детально описанные в классификации F.J. Vertucci [3] и подтверждённые микрокомпьютерной томографией М.А. Versiani и соавт [2].

Для компенсации ограниченный механического этапа применяется химическая ирригация. Золотым стандартом остаётся последовательное применение гипохлорита натрия (NaOCl) и этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА), чей синергетический эффект обоснован в работах М. Naarasalo и Y. Shen [4]. Однако доставка растворов во все участки системы корневых каналов наталкивается на серьёзные физико-химические и биологические барьеры.



Традиционная доставка ирригантов с помощью шприца и иглы (пассивная ирригация) оказывается крайне неэффективной. Исследования С. Boutsioukis и соавт [5] с применением вычислительной гидродинамики продемонстрировали, что поток жидкости проникает апикальное кончика иглы лишь на 1-1,5 мм, после чего разворачивается к устью, формируя застойную зону. Ситуация усугубляется феноменом «паровой пробки»: при реакции NaOCl с органикой выделяются газы, которые скапливаются в апикальной части канала, вытесняя раствор и полностью блокируя его контакт со стенками [13]. Для разрушения этого пузыря и создания турбулентных потоков необходима активная активация ирриганта.

Концепция активации заключается в передаче раствору дополнительной кинетической энергии. Среди множества методик наибольшее клиническое распространение получили звуковая и ультразвуковая активация. Несмотря на обилие исследований, вопрос о превосходстве одного метода над другим остаётся предметом дискуссий, что и определило цель настоящего обзора.

Анатомические предпосылки и ограничения традиционной обработки

Система корневых каналов представляет собой не совокупность одиночных цилиндров, а разветвлённую сеть, включающую магистральные каналы, латеральные ответвления, анастомозы, перешейки и апикальные дельты. О.А. Peters [1] указывает, что даже при использовании современных вращающихся никель-титановых инструментов остаются необработанными от 35% до 50% поверхности стенок. Причина кроется в геометрическом несоответствии круглого сечения файла и естественной овальной, щелевидной или почкообразной формы канала.

Микрокомпьютерная томография, выполненная М.А. Versiani и соавт [2], показала, что в апикальной трети объём необработанных участков может достигать 40%. Особую сложность представляют С-образные конфигурации и перешейки, где скапливаются дентинные опилки и остатки пульпы. F.J. Vertucci [3] в своей классификации продемонстрировал, что сложные конфигурации (типы IV-VIII) встречаются в 25-45% премоляров и моляров. Эти данные подтверждают, что механическая обработка выполняет лишь роль создания пространства для ирригации, а основная задача дезинфекции ложится на раствор и его активацию.

Таким образом, клинический успех напрямую зависит от способности ирриганта проникать во все ниши, включая те, которые остались интактными после инструментальной обработки.

Гидродинамика и феномен «паровой пробки»

Эффективность доставки ирриганта в глубокие отделы системы корневых каналов жёстко ограничена законами гидродинамики. Традиционная позитивная ирригация имеет критически малый радиус действия. С. Boutsioukis и соавт [5] показали, что при использовании стандартной иглы 30G раствор проникает лишь на 1-1,5 мм апикальное кончика. В узком замкнутом пространстве поток быстро теряет кинетическую энергию, разворачивается и устремляется к устью, оставляя апикальную треть в состоянии застоя.

Основным физическим препятствием является «паровая пробка». При контакте NaOCl с органическими тканями происходит бурная реакция с выделением кислорода, углекислого газа и аммиака. В микропространстве канала эти пузырьки объединяются, формируя стабильный воздушный барьер, который вытесняет раствор. По данным С. Boutsioukis и В. Verhaagen [13], наличие такого пузырька в апикальных 2-3 мм снижает площадь контакта ирриганта с дентином на 75-90%. Давления ручного шприца недостаточно для разрушения этой пробки из-за высокого поверхностного натяжения жидкостей. Следовательно, без активной физической стимуляции химическое воздействие в наиболее инфицированной зоне практически отсутствует.

Кроме того, пассивный поток не создаёт достаточного касательного напряжения, необходимого для отрыва биоплёнки от дентина. Как справедливо отмечают L.S. Gu и соавт



[6], переход от пассивного обмывания к активной гидродинамической обработке является единственным способом преодолеть указанные физические барьеры и обеспечить полноценную дезинфекцию.

Сравнительная эффективность удаления смазанного слоя и дентинного дэбриса

Удаление смазанного слоя и дэбриса является центральной задачей ирригации. Фундаментальные исследования М. Torabinejad и соавт [10] доказали, что полная элиминация органических и неорганических остатков невозможна без сочетания хелатирующих агентов с активной активацией. В работе L.M. Jiang и соавт [12] сравнивалась способность ультразвуковой (PUI) и звуковой (EndoActivator) систем удалять дэбрис из стандартизированных искусственных углублений в стенках каналов. Результаты показали, что PUI удалила до 90% накопленного материала, тогда как звуковая активация – около 70%, а пассивная ирригация шприцем – лишь 30-40%.

Однако наиболее ярко различия проявляются при очистке сложных анатомических структур. О.К. Montaser и соавт [20] в 2023 году продемонстрировали, что эффективность PUI при очистке перешейков (isthmus) составила 92%, тогда как звуковая активация – 76%. Столь выраженная разница объясняется физическими механизмами: ультразвук на частотах 25-30 кГц создаёт мощное акустическое микротечение, скорость потока которого, по данным А. Al-Jadaa и соавт [11], в 3-4 раза выше, чем при звуковых колебаниях (1-6 кГц). Высокая скорость потока генерирует необходимое касательное напряжение для отрыва плотно фиксированного дэбриса и биоплёнки.

Звуковая активация, хотя и уступает в абсолютных показателях, реализует иной принцип: высокоамплитудные возвратно-поступательные движения гибкой насадки создают интенсивное макроперемешивание, обеспечивающее постоянное обновление раствора на всём протяжении канала. Это особенно ценно в ситуациях, когда применение жёсткого ультразвукового файла ограничено.

Антибактериальная активность и воздействие на биоплёнки

Основной целью эндодонтического лечения является элиминация патогенной микрофлоры, и золотым стандартом оценки дезинфицирующих протоколов служит способность подавлять *E. faecalis*. R.M. Love [9] показал, что этот микроорганизм способен инвазировать дентинные трубочки на глубину до 200-400 мкм, становясь недостижимым для пассивной ирригации.

В клинико-лабораторном испытании С. Liu и соавт [19] сравнивалась антибактериальная эффективность различных методов активации. Ультразвуковая PUI снижала бактериальную нагрузку на 99,2%, звуковая активация (EndoActivator) – на 96,8%, в то время как лазерная активация показала наиболее высокий результат – 99,7%. Несмотря на кажущуюся небольшую разницу, в абсолютных значениях числа колониеобразующих единиц преимущество PUI остаётся существенным для предотвращения рецидивов.

Систематический обзор К. Abouzaid и S. Dhaimy [18] подтвердил, что ультразвук статистически значимо эффективнее звука при воздействии на зрелые 4-недельные биоплёнки, причём разница в эффективности достигала 15-20%. Авторы связывают это с кавитацией – образованием и стремительным схлопыванием микропузырьков, генерирующих ударные волны, которые механически разрушают защитный матрикс биоплёнки и облегчают доступ NaOCl к бактериальным клеткам.

Вместе с тем, важным фактором является геометрия препарирования. S. Paixao и соавт [21] отметили, что при увеличении апикального диаметра свыше №35 по ISO разница между звуковыми и ультразвуковыми методами нивелируется, и обе системы демонстрируют элиминацию бактерий на уровне 95-98%. Это объясняется более свободной циркуляцией раствора в широком канале, когда для обновления антисептика в критической зоне достаточно меньшей энергии звуковых колебаний.



Очистка труднодоступных участков: анастомозы и перешейки

Латеральные ответвления и перешейки представляют собой зоны, практически недоступные для механического воздействия. С. de Gregorio и соавт [8] специально изучали глубину проникновения ирриганта в искусственную латеральную сеть. Ультразвуковая активация обеспечивала заполнение раствором 85% боковых каналов, тогда как звуковая – лишь 65%.

Особый интерес представляют данные по очистке перешейков. Исследование О.К. Montaser и соавт [20] показало, что PUI очищает 92% площади перешейка против 76% при звуковой активации. Физической основой этого преимущества является акустическое микротечение. Как показали А. Al-Jadaa и соавт [11], скорость потока ирриганта при ультразвуковой активации в 3-4 раза выше, чем при звуковой. Высокая скорость критически важна для создания сдвиговых напряжений на стенках узкого перешейка, необходимых для отрыва дебриса и бактериального матрикса.

В то же время, гибкость звуковых насадок позволяет им работать в сильно искривлённых каналах, где ультразвуковой файл может контактировать со стенкой и терять эффективность. L.W.M. van der Sluis и соавт [7] подчёркивают, что именно пассивный ультразвук наиболее эффективно «вымывает» опилки дентина, которые забиваются в перешейки во время инструментации, предотвращая формирование пробки, препятствующей полноценной obturации.

Клинико-экспериментальное обоснование и дифференцированные рекомендации

Данные клинических исследований подтверждают результаты лабораторных экспериментов. Л.М. Попова [14] установила, что ультразвуковая активация обеспечивает микробиологическую стерильность каналов в 88% случаев, звуковая – в 82%, а традиционная шприцевая ирригация – лишь в 54%. А.А. Волошина [22] (2025 г.) показала, что при лечении зубов с изгибом корня более 35° применение активации снижает частоту послеоперационных болей на 45%, причём достоверной разницы между звуком и ультразвуком по этому параметру не выявлено ($p > 0,05$).

С точки зрения безопасности, И.И. Валеева и соавт [15] (2025 г.) зафиксировали, что использование полимерных насадок в сильно изогнутых каналах приводило к образованию микротрещин дентина на 18% реже, чем применение стальных ультразвуковых файлов. Это делает звуковую активацию предпочтительной в зубах с хрупким дентином или несформированными верхушками.

Качество obturации также коррелирует с методом ирригации. В.В. Даников и соавт [16] (2024 г.) показали, что после ультразвуковой активации плотность прилегания силера к стенкам канала на 22% выше. Мета-анализ S. Raíxaо и соавт [17] на базе 15 исследований *in vitro* подтвердил статистически значимое преимущество ультразвука в удалении дебриса (стандартизованная разница средних = 0,84). Однако в отношении долгосрочной выживаемости зубов (5–10 лет) клинически значимых различий между звуком и ультразвуком пока не выявлено, что оставляет за врачом право выбора.

На основе обобщённых данных можно сформулировать следующие практические рекомендации:

1. Дифференцированный выбор метода. В прямых и широких каналах, а также при наличии перешейков и сложной анатомии следует отдавать предпочтение PUI для максимальной реализации эффектов кавитации и акустического течения. В каналах с выраженной кривизной (более 35°), при апикальных резорбциях или несформированной верхушке целесообразно применять звуковую активацию гибкими насадками, что минимизирует риск ятрогенного повреждения дентина и экструзии ирриганта.

2. Временной и количественный регламент. Минимальное время активации раствора в каждом канале должно составлять 30-60 секунд (например, 3 цикла по 20 секунд) с



обязательным обновлением ирриганта после каждого цикла. Для полноценного удаления смазанного слоя необходима заключительная активация 17% ЭДТА не менее 1 минуты.

3. Техника безопасности. Ультразвуковая насадка должна находиться в канале в свободном, пассивном состоянии, располагаясь на 1-2 мм короче рабочей длины, чтобы исключить контакт со стенками и блокировку колебаний. При использовании высококонцентрированного NaOCl обязательна надёжная изоляция рабочего поля коффердамом и контроль давления подачи раствора.

4. Особенности повторного лечения. При удалении временных вложений (гидроксид кальция) или остатков пломбирочных материалов этап активной ирригации значительно эффективнее шприцевого промывания, что способствует лучшей очистке дентинных трубочек перед финальной obturацией.

Применение активных методов ирригации позволяет сократить сроки купирования болевого синдрома в послеоперационном периоде, повысить адгезию силеров к дентину и статистически увеличить процент успешных исходов первичного лечения с 74% до 91%.

Заключение

Проведённый обзор литературы подтверждает, что современная эндодонтия окончательно сместилась в сторону приоритета активной химической дезинфекции. Ультразвуковая активация (PUI) демонстрирует статистически более высокую эффективность в разрушении зрелых биоплёнок, очистке перешейков и удалении плотного дебриса благодаря феномену кавитации и мощному акустическому микротечению. Звуковая активация, напротив, является методом выбора в каналах с выраженной кривизной благодаря высокой гибкости насадок и минимальному риску повреждения дентина. Оба метода значительно превосходят пассивную ирригацию по всем параметрам. Выбор конкретной методики должен основываться на анатомических особенностях зуба, однако сам факт использования активной ирригации сегодня следует считать обязательным стандартом эндодонтического протокола, способным повысить надёжность первичного лечения до 91%.

Список литературы:

1. Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems. *Int Endod J.* 2004;37(1):8–16. doi: 10.1111/j.0143-2885.2004.00775.x
2. Versiani MA, Pécora JD, Sousa-Neto MD. Micro-computed tomography analysis of root canal anatomy. *J Endod.* 2013;39(12):1617–1621. doi: 10.1016/j.joen.2013.07.026
3. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1984;58(5):589–599. doi: 10.1016/0030-4220(84)90085-9
4. Haapasalo M, Shen Y, Qian W, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Dent Clin North Am.* 2010;54(2):291–312. doi: 10.1016/j.cden.2009.12.001
5. Boutsoukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E. Irrigation flow within a prepared root canal. *Int Endod J.* 2010;43(2):144–155. doi: 10.1111/j.1365-2591.2009.01654.x
6. Gu LS, Kim JR, Ling J, et al. Review of irrigant agitation techniques. *J Endod.* 2009;35(6):791–804. doi: 10.1016/j.joen.2009.03.010
7. van der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR. Passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J.* 2007;40(6):415–426. doi: 10.1111/j.1365-2591.2007.01243.x
8. de Gregorio C, Estévez R, Cisneros R, et al. Effect of ultrasonic and sonic activation. *Int Endod J.* 2010;43(11):993–1001. doi: 10.1111/j.1365-2591.2010.01765.x
9. Love RM. *Enterococcus faecalis* in endodontic failure. *J Endod.* 2001;27(2):117–121. doi: 10.1097/00004770-200102000-00008
10. Torabinejad M, Khademi AA, Babagoli J, et al. Removal of the smear layer. *J Endod.* 2002;28(3):141–144. doi: 10.1097/00004770-200203000-00003



11. Al-Jadaa A, Paqué F, Attin T, Zehnder M. Acoustic microstreaming. *J Endod.* 2009;35(12):1726–1729. doi: 10.1016/j.joen.2009.08.018
12. Jiang LM, Lak B, Eijsvogels LM, et al. Sonic vs ultrasonic irrigation. *J Endod.* 2011;37(10):1474–1478. doi: 10.1016/j.joen.2011.06.023
13. Boutsoukias C, Verhaagen B, Versluis M, et al. Irrigant flow evaluation. *Int Endod J.* 2014;47(2):113–125. doi: 10.1111/iej.12128
14. Popova LM. Comparative evaluation of irrigant activation methods. *Russian Stomatological Journal.* 2020;24(5):62–67. (In Russ.) doi: 10.17816/rsj2020562-67
15. Valeeva II, Amerkhanov BI, Dmitrakova NR. Comparative evaluation of methods of activation of irrigation solutions in endodontic practice. *Modern Science.* 2025;8–12. (In Russ.)
16. Danikov VV, Grishina YA, Zakharov MA, Koroleva AS. Modern methods of endodontic treatment of root canals of teeth. *International Research Journal.* 2024;4(142):86. (In Russ.)
17. Paixão S, Rodrigues C, Grenho L, Fernandes MH. Efficacy of sonic and ultrasonic activation during endodontic treatment: a meta-analysis of in vitro studies. *Acta Odontol Scand.* 2022;80(8):588–595. doi: 10.1080/00016357.2022.2064149
18. Abouzaid K, Dhaimy S. Antibacterial efficacy of sonic versus ultrasonic irrigation of the root canal system: A systematic review. *J Oral Health Dent Sci.* 2021;5:1-14.
19. Liu C, Li Q, Yue L, Zou X. Evaluation of sonic, ultrasonic, and laser irrigation activation systems to eliminate bacteria from the dentinal tubules of the root canal system. *J Appl Oral Sci.* 2022;30:e20220199. doi: 10.1590/1678-7757-2022-0199
20. Montaser OK, Fayyad DM, Abdelsalam N. Efficacy of different irrigant activation techniques for cleaning root canal anastomosis. *BMC Oral Health.* 2023;23(1):142. doi: 10.1186/s12903-023-02831-7
21. Paixão S, Gomes PS, Fernandes MH, Rodrigues C, Grenho L. Comparative evaluation of ultrasonic and sonic irrigant activation systems: Assessing extrusion risk, debridement, and biofilm removal in distinct apical preparation sizes. *Appl Sci.* 2024;14(9):3904. doi: 10.3390/app14093904
22. Voloshina AA. Clinical and experimental justification of the use of antiseptic solution activation in root canals of teeth with complex anatomy: dissertation... candidate of medical sciences. Moscow: Sechenov University; 2025. 111 p. (In Russ.).

