

Кавитация и временная полость: семантическая двусмысленность ошибочных аналогий в раневой баллистике

 **А.В. Кокин**^{1,2}

¹ Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы имени профессора А.Р. Шляхова при Министерстве юстиции Российской Федерации, Москва 101000, Россия

² Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя, Москва 117997, Россия

Аннотация. Современные исследования в области раневой баллистики позволили установить основные повреждающие факторы выстрела, механизм формирования огнестрельной раны, включая динамику образования временных полостей (временных пульсирующих полостей), возникающих вследствие передачи кинетической энергии от снаряда к биологическим тканям. Однако в научной литературе встречается некорректное применение термина «кавитация» при описании данных процессов, что создает терминологическую амбивалентность. Строгое определение кавитации, принятое в гидродинамике, относится к явлению образования полостей (пузырьков) в жидкой среде при локальном снижении давления ниже точки насыщения, вызванном высокоскоростным движением твердого тела. Данный физический процесс принципиально отличается от механизма образования временной полости при огнестрельном ранении, где основную роль играют инерционные деформации тканей, а не фазовые переходы жидкости. Использование одного термина для обозначения разнородных явлений противоречит принципам научной терминологии, повышая риск некорректной интерпретации данных как в теоретических моделях, так и в прикладных исследованиях. В статье проведен сравнительный анализ физических механизмов, лежащих в основе кавитации (гидродинамический контекст) и формирования временных полостей при огнестрельной ране, систематизированы терминологические ошибки в научных публикациях, приведших к искаженному пониманию механики огнестрельной раны. Выдвигается предложение о целесообразности исключения термина «кавитация» из контекста раневой баллистики. Это минимизирует семантические ошибки, повысит точность междисциплинарных исследований и устранил методологические противоречия, поскольку терминологическая строгость является критичным условием для обеспечения воспроизводимости результатов исследований и эффективной междисциплинарной интеграции знаний.

Ключевые слова: судебная экспертиза, временная полость, временная пульсирующая полость, кавитация, огнестрельная рана, раневая баллистика, раневой канал

Для цитирования: Кокин А.В. Кавитация и временная полость: семантическая двусмысленность ошибочных аналогий в судебной баллистике // Теория и практика судебной экспертизы. 2026. Т. 21. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2026-1-48-59>

Cavitation and Temporary Cavity: Semantic Ambiguity of Wrong Analogies in Wound Ballistics

 **Andrey V. Kokin**^{1,2}

¹ The Russian Federal Centre of Forensic Science named after Professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Moscow 101000, Russia

² Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow 117997, Russia

Abstract. Modern studies in the area of wound ballistics made it possible to establish main damaging factors of a shot, the formation mechanism of a gunshot wound, including temporary cavity dynamics resulting from the kinetic energy transfer from a bullet to biological tissues. However, there is an incorrect use of the term “cavitation” in the scientific literature when describing these processes, which creates

terminological ambivalence. The strict definition of cavitation, adopted in hydrodynamics, refers to the phenomenon of the formation of cavities (bubbles) in a liquid medium with a local decrease in pressure below the saturation point caused by high-speed motion of a solid. This physical process is fundamentally different from the mechanism of a temporary cavity formation in a gunshot wound where the main role is played by inertial deformations of tissues rather than the phase transitions of fluid. The use of one term to define heterogeneous phenomena contradicts the principles of scientific terminology, increasing the risk of incorrect data interpretation both in theoretical models and in the applied research. The article provides a comparative analysis of the physical mechanisms underlying cavitation (hydrodynamic context) and the formation of temporary cavities in a gunshot wound. It also systematizes the terminological errors in scientific publications that led to a distorted understanding of the gunshot wound mechanics. The author suggests to exclude using the term «cavitation» in the context of wound ballistics.

This would minimize semantic errors, increase the accuracy of interdisciplinary studies and eliminate methodological contradictions, since terminological rigor is crucial for ensuring reproducibility of examination results and effective interdisciplinary knowledge integration.

Keywords: forensic examination, temporary cavity, temporary pulsating cavity, cavitation, gunshot wound, wound ballistics, wound canal

For citation: Kokin A.V. Cavitation and Temporary Cavity: Semantic Ambiguity of Wrong Analogies in Forensic Ballistics. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2026. Vol. 21. No. 1. P. 48–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2026-1-48-59>

Введение

Целью настоящей статьи является анализ терминологических рисков, обусловленных некорректным использованием понятия «кавитация» в раневой и судебной баллистике. Данный термин применяется с конца 19 века для описания динамики формирования временных полостей (временных пульсирующих полостей) при огнестрельных ранениях [1], но при этом относится к принципиально иному классу физических явлений, что требует пересмотра его применения в контексте судебно-медицинских и судебно-баллистических исследований. Соответственно, для достижения поставленной цели потребовалось рассмотреть механизм формирования огнестрельного ранения, систематизировать современные знания о кавитации как физическом явлении, проанализировать причины заимствования термина «кавитация» в раневую баллистику, провести обзор научных публикаций в области раневой баллистики и смежных дисциплин для оценки уровня понимания авторами термина «кавитация» и возможностей определения типичных ошибок его применения.

1. Кинетическая энергия в раневой баллистике: формирование раневого канала и временной полости

Исследование воздействия различных снарядов, в том числе и пуль, на биологические ткани требует применения моделей,

учитывающих их реологические свойства. В рамках данной публикации ткани организма человека рассматриваются как упруговязкая среда [2, с.102], что в целом коррелирует с подходами, принятыми в рамках методов биомеханического моделирования раневой баллистики [3].

Проникновение пули в биологическую ткань сопровождается формированием зоны перманентного повреждения, возникающего вследствие прямого механического воздействия и воздействия кинетической энергии снаряда на тканевые структуры. Данная зона, называемая раневым каналом, характеризуется необратимыми морфофункциональными изменениями, включая некроз клеток, разрыв волокон соединительной ткани, деструкцию сосудов, разрушение костных образований. Морфологическая структура раневого канала сохраняет устойчивую конфигурацию даже после прекращения движения пули.

В самых общих чертах, раневой канал имеет сходство с повреждениями, образованными колющими объектами (например, шилом, заточкой, рапирой), когда их образование происходит за счет концентрации давления на ткань острием колющего предмета, превышения предела ее прочности и последующего необратимого разрушения. Однако ключевым отличием действия пули является формирование временной полости – физического явления, обусловленного передачей ее кинетической энергии окружающим тканям.

Формула кинетической энергии (1) демонстрирует, что энергия пули возрастает с увеличением ее массы, но еще больше увеличивается с возрастанием скорости пули:

$$E = \frac{mV^2}{2}, \quad (1)$$

где E – кинетическая энергия пули,
 m – масса пули,
 V – скорость пули.

При движении пули в биологических тканях имеет место снижение ее скорости вследствие взаимодействия с окружающей средой, что, в соответствии с законом сохранения энергии, приводит к уменьшению кинетической энергии. Отрицательное ускорение (при торможении) в среде из-за действия силы лобового сопротивления может быть описано следующей формулой:

$$a_T = \frac{F_{\text{сопр}}}{m} = -\frac{\frac{1}{2}\rho V^2 SC_x}{m} = -\frac{\rho V^2 SC_x}{2m}, \quad (2)$$

где a_T – ускорение торможения,
 $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления среды,
 m – масса пули,
 ρ – плотность среды,
 V – скорость движения пули,
 S – площадь поперечного сечения пули,
 C_x – коэффициент лобового сопротивления.

Из формулы (2) следует, что отрицательное ускорение при торможении обратно пропорционально массе пули и прямо пропорционально плотности среды, квадрату скорости, площади поперечного сечения и коэффициенту лобового сопротивления, зависящего от формы головной части пули и числа Маха при данном режиме движения.

Убыль кинетической энергии пули при ее перемещении в теле из точки 1 в точку 2, согласно закону сохранения энергии, теоретически должна соответствовать приращению кинетической энергии деформируемой ткани:

$$\Delta E_{\text{пули}} = E(2) - E(1) = -\Delta E_{\text{ткани}}. \quad (3)$$

Однако данное утверждение некорректно ввиду диссипативных процессов, сопровождающих взаимодействие: совершения работы по формированию раневого канала, термодинамических потерь (теплообразование), акустического рассеяния энергии и других форм ее преобразования.

С помощью приведенных формул и посредством несложных математических преобразований (путем введения в числитель и

знаменатель массы пули $[m]$) можно продемонстрировать потерю кинетической энергии пули (динамику передачи энергии) на единицу пути внутри биологической ткани:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dX} &= F_{\text{сопр}} = -\frac{1}{2}\rho V^2 SC_x = \\ &= -\left(\frac{1}{2}mV^2\right)(\rho)\left(\frac{S}{m}C_x\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная структура уравнения, условно разделенная скобками на три части, достаточно показательна. Она иллюстрирует, что энергетические потери пули (и, соответственно, передача энергии тканям) пропорциональны следующим параметрам: величине исходной кинетической энергии (поскольку передача невозможна при ее отсутствии); плотности среды, сохраняющей условную постоянность; характеристикам (геометрия и масса) пули, которые могут вариативно изменяться по ее траектории.

Если рассматривать характеристики пули как постоянные, то при поражении организма будет действовать закон сохранения энергии: чем выше кинетическая энергия пули, тем больше энергии будет передано тканям. Часть энергии расходуется на образование раневого канала; избыток поглощается окружающими тканями, которые, будучи эластичными, расширяются в радиальном направлении, формируя временную полость. В результате действия инерционных сил и ударной волны эта полость образуется сразу после прохождения пули, но затем она схлопывается по причине эластичности тканей. Из формулы (4) следует, что передача кинетической энергии происходит экспоненциально. В таком случае временная полость должна иметь более или менее одинаковую форму для пуль, характеристики которых остаются неизменными при прохождении через ткани (например, сферических снарядов, некоторых пистолетных и револьверных пуль) [4, с. 112].

Изменение характеристик пули действует на скорость передачи энергии окружающим тканям. В частности, утрата пуль гироскопической устойчивости, ее деформация или фрагментация приводят к нелинейной динамике передачи энергии, что объясняет формирование различного профиля временных полостей у разных типов пуль [2, 4, 5]. Суммарная энергия, передаваемая ткани, может быть аппроксимирована интегралом локальных потерь энергии вдоль раневого канала, что соответствует уравнению:

$$E_{\text{пер}} = \int_0^L E_{\text{пер}}(x) dx = \int_0^L \frac{dE}{dx} dx = E, \quad (5)$$

где $E_{\text{пер}}$ – кинетическая энергия передаваемая тканям,

E – кинетическая энергия пули,

L – глубина проникновения пули в ткани.

Для повышения точности модели необходимо учитывать дополнительные факторы энергетического баланса: потери энергии на разрушение тканей, акустическую эмиссию, термодинамические потери, вязкость среды и т. п.

2. Кавитация как гидродинамическое явление

В некоторых работах по раневой баллистике феномен формирования временной полости нередко интерпретируется через призму кавитационных процессов, возникающих при высокоскоростном движении твердого тела в жидкой среде [2, с. 115–116]. Однако в рамках классической физики термин «кавитация» имеет строго определенное значение, относящееся к образованию паровых и газовых полостей в жидкости вследствие локального снижения давления ниже критического уровня [6, с. 5; 7, с. 34]. Под кавитацией понимают явление парообразования и выделения воздуха, обусловленное понижением давления в жидкости.

Причиной ее возникновения служит кипение жидкости при нормальной температуре и низком давлении. Появлению кавитации способствует растворенный в жидкости воздух, который выделяется при уменьшении давления [8, с. 9]. Образующиеся при этом кавитационные пузырьки (паровые полости) характеризуются динамической нестабильностью, а интенсивность процесса может быть количественно оценена безразмерным параметром – числом кавитации (σ), выражающим соотношение между перепадом давления и кинетической энергией потока:

$$\sigma = \frac{P - P_{\text{кр}}}{\frac{1}{2} \rho V^2}, \quad (6)$$

где P – давление жидкости,

$P_{\text{кр}}$ – давление возникновения кавитации,

ρ – плотность жидкости,

V – скорость жидкости.

Значения давления и скорости, необходимые для количественной оценки кавита-

ции, определяются в соответствии с конкретными гидродинамическими условиями. Например, при движении объекта в жидкости кавитационное число рассчитывается на основе характеристик невозмущенного потока. Высокое кавитационное число исключает возникновение кавитации, что обусловлено доминированием статического давления над давлением парообразования, предотвращающего образование и рост паровых полостей. Напротив, при снижении кавитационного числа ниже критического порога наблюдается инициирование кавитационных процессов вследствие локального достижения давления насыщенных паров жидкости.

Кавитационные пузырьки со временем изменяются в размерах. В рамках модели сферически симметричной каверны данный процесс описывается уравнением Рэлея-Плессета – нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка, связывающим зависимость радиуса пузырька $R(t)$ от времени с давлением жидкости. Данное уравнение допускает модификации для моделирования кавитационных пузырьков сложной геометрии [9, с. 9–11]. При малых значениях поверхностного натяжения и вязкости уравнение принимает упрощенную форму:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = - \frac{P - P_{\text{кр}}}{\rho}, \quad (7)$$

где R – радиус кавитационного пузырька, t – время.

На начальной стадии наблюдается экспоненциальный рост кавитационного пузырька (рис. 1, стадии 1–3), сменяемый фазой коллапса при повышении внешнего давления (рис. 1, стадия 4). Окончательное схлопывание сопровождается формированием высокоскоростной микроструи, направленной к поверхности (рис. 1, стадии 4 и 5) [10, с. 283]. Помимо этого, при коллапсе образуется кластер микропузырьков (рис. 1, стадия 6), дальнейшее схлопывание которых индуцирует ударные волны [11]. Возникновение дополнительной ударной волны на завершающей стадии коллапса обусловлено упругим отражением неконденсирующегося газа.

В процессе кавитации индуцируется последовательное образование кавитационных пузырьков (рис. 1, стадия 6), сопровождающееся эрозионным разрушением поверхностей, вибрационными нагрузками и сопутствующей коррозией металлических

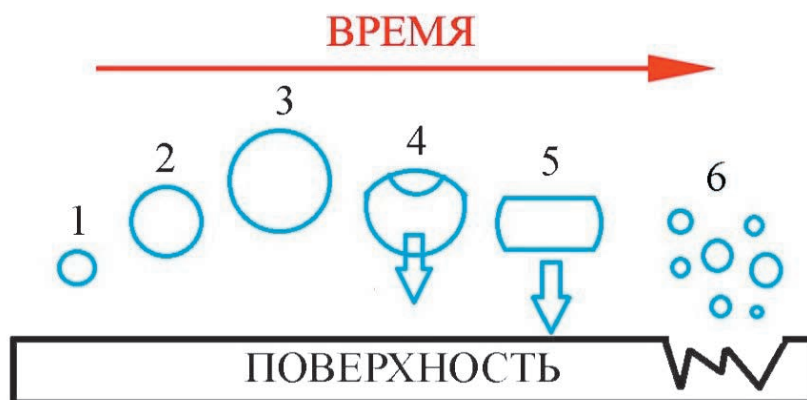


Рис. 1. Динамика кавитационного процесса
Fig. 1. Cavitation process dynamics

поверхностей (рис. 2) [12, 13]. Размеры и число пузырьков уменьшаются с увеличением вязкости жидкости, что обуславливает снижение интенсивности деструктивных процессов. Напротив, повышение плотности жидкости усиливает деструктивный потенциал микроструйных образований вследствие роста их кинетической энергии.

Проявление кавитационных явлений не ограничивается системами с движущимися твердыми телами. Они наблюдаются в гидродинамических агрегатах (насосах, турбинах, клапанах), трубках Вентури, водосбросных сооружениях, а также в стацио-

нарных жидкостях под воздействием внешних энергетических воздействий: акустических волн [14], лазера [15] и магнитного поля [16]. Эффекты кавитации также имеют утилитарное применение. Например, в промышленной очистке (ультразвуковая очистка, водоочистка), пищевой индустрии (пастеризация, интенсификация процессов брожения в пивоварении и виноделии и т. д.), в химических производствах (синтез эмульсий, электролитическое осаждение и т. д.), биомедицине (таргетная доставка лекарств, онкотерапия, неинвазивная косметология и т. д.).



Рис. 2. Эрозионное разрушение поверхности лопасти гребного винта, вызванное кавитационным процессом
Fig. 2. Erosive destruction of the propeller blade surface caused by the cavitation process

3. Причины терминологического заимствования понятия «кавитация» из гидродинамики в раневую баллистику

Во второй половине 19 века в научной среде получили распространение различные экзотические гипотезы, объясняющие механизм повреждения тканей организма пулями. Среди них фигурировали представления о воздействии центробежной силы, возникающей при вращении снаряда, а также предположения о плавлении свинца в момент удара, ведущем к термическому поражению тканей [17, с. 89; 7, с. 88–89]. Параллельно кораблестроители исследовали феномен эрозии гребных винтов, и в 1897 году С. Барнаби (S. Barnaby) и Дж. Торникрофт (J. Thorneycroft) впервые связали разрушение лопастей с кавитацией – образованием и схлопыванием газовых пузырьков в жидкости [17, с. 89].

Это открытие стимулировало междисциплинарные аналогии: уже в 1898 году исследователь в области раневой баллистики К. Вудрафф (C. Woodruff) адаптировал термин «кавитация» для описания динамики повреждения тканей, подчеркнув значение передачи кинетической энергии снаряда [1]. Несмотря на то, что аналогия между кавитацией в гидродинамике и формированием временной полости при огнестрельном ранении носит умозрительный характер и не учитывает фундаментальных различий физических процессов, термин все же закрепился в лексиконе раневой баллистики.

В конце 19 века ни механизм кавитации, ни механогенез огнестрельных ранений, включая феномен временной полости, не имели строгого теоретического обоснования, что способствовало доминированию поверхностных аналогий над анализом специфики явлений. Однако результаты последующих исследований позволили четко дифференцировать эти процессы, продемонстрировать различную природу и закономерности их образования.

Прежде чем приступить к анализу научных публикаций, целесообразно рассмотреть ряд аспектов, пренебрежение которыми может привести к терминологической и концептуальной неоднозначности.

Экспериментальные данные демонстрируют, что размеры кавитационных пузырьков, включая их кластерные образования, существенно меньше параметров временной полости, что исключает их морфологическое соответствие. Аналогичным образом, суперкавитационные структу-

ры, формирующиеся около поверхностей движущихся объектов, не могут быть отождествлены с временной полостью в силу различий в пространственной организации: данные образования характеризуются продольной ориентацией относительно направления движения, а временная полость имеет выраженную поперечную динамику.

Распространенное мнение, унаследованное из ранних исследований, связывает возникновение кавитации с необходимостью достижения экстремально высоких скоростей. Однако интерпретация термина «высокая скорость» варьируется в зависимости от прикладного контекста. Например, на морских судах четырехлопастные винты диаметром 5–8 м вращаются со скоростью 60–120 об/мин. На глиссирующих судах двух и более лопастные винты вращаются со скоростью 2200–2800 об/мин, а на спортивных – до 5000 об/мин¹, при этом известно, что для инициирования кавитационных процессов достаточны существенно меньшие значения.

Эксперименты К. Бреннена (C. Brennen) с обтеканием потоком жидкости сферического объекта диаметром 7,62 мм показали, что первичное образование пузырьков наблюдается уже при скорости 5,6 м/с (рис. 3), а формирование развитой кавитационной полости — при 10,7 м/с [7, с. 234]. Данные результаты опровергают гипотезу о значимой роли кавитации в механизме образования огнестрельных ранений.

Дополнительная терминологическая неоднозначность возникла в результате работы Р. Хилла (R. Hill), который в 1943–1946 гг. изучал пробивание толстых броневых плит снарядами с карбид-вольфрамовыми сердечниками [18, с. 249]. Обнаруженный феномен – превышение входного диаметра пробоин над калибром снарядов – был назван исследователем «кавитацией» по аналогии с гидродинамическими процессами. Несмотря на отсутствие физического сходства, данный термин закрепился в терминальной баллистике для описания деформации твердых преград [19, с. 61–69]. В настоящей публикации этот семантический вариант термина «кавитация» исключается из рассмотрения в силу его принципиальной несовместимости с представлениями классической гидродинамики.

¹ Подбор гребного винта // Лодочный портал. <https://www.kateralodki.ru/vintylodoch/> (дата обращения 18.10.2025).

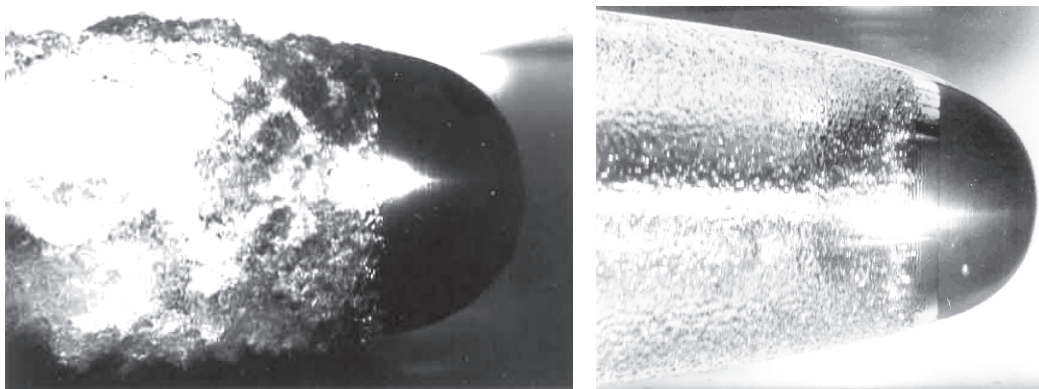


Рис. 3. Кавитирующая сфера диаметром 7,62 см.

Пузырьковая кавитация и пузырьковый след (слева) перед переходом в полностью сформировавшуюся полость (справа). Поток движется справа налево, со скоростями 5,6 м/с и 10,7 м/с соответственно [7]

Fig. 3. Cavitating sphere with a diameter of 7.62 cm. Bubble cavitation and bubble wake (left) before passing into a fully formed cavity (right). The flow moves from right to left, with speeds of 5.6 m/s and 10.7 m/s, respectively [7]

Анализ работ, посвященных механизму огнестрельных ранений, в контексте использования термина «кавитация»

При анализе существующих научных интерпретаций механизма формирования временной полости в раневой баллистике обнаруживается терминологическая неоднозначность, связанная с использованием понятия «кавитация». Ряд исследований связывают с данным явлением собственно образование временной полости, что противоречит классическому физическому определению кавитации. Для устранения семантических противоречий при анализе обсуждаемых концепций введем условное контекстуальное разграничение:

1. *Кавитация* (выделено курсивом) – условное обозначение, применяемое в некорректных интерпретациях для описания передачи кинетической энергии и формирования временной полости в биологических тканях.

2. Кавитация (обычный шрифт) – классическое понимание явления в рамках гидродинамики, соответствующее устоявшейся научной теории.

В научных работах по исследованию механизма формирования огнестрельных ранений использование термина «кавитация» демонстрирует значительную терминологическую вариативность. Анализ публикаций позволяет условно разделить их на три категории, отражающие различия в интерпретации и использовании данного явления.

Категория А: работы, исключаящие термин «кавитация».

В монографиях Л.М. Эйдлина (1939 и 1963 гг.) механизм формирования раневого

канала трактуется через призму непосредственного контакта пули с биологическими тканями, где ключевая роль отводится передаче кинетической энергии снаряда и сопротивлению тканевой среды. Образование обширных рваных ран внутренних органов автор объясняет гидродинамическим действием, возникающим при распространении ударной волны от снаряда в жидких средах организма [20, 21].

В трудах В. Ди Майо (V. Di Maio) [22], С. Шума и Б. Мадея (С. Schyma, В. Madea) [23], Е.К. Гумаренко и соавторов [24], А.П. Громова и В.Г. Науменко [25], В.В. Хохлова и Л.Е. Кузнецова [26], С.В. Леонова, П.В. Пинчука, С.В. Гусевой [27] в описании механогенеза огнестрельных ранений фигурирует феномен временной полости. При этом в указанных работах не упоминается термин «кавитация», что свидетельствует о сдержанной позиции авторов в отношении роли данного физического явления в формировании повреждений, вызванных воздействием огнестрельного снаряда.

Б. Кнебюэль (В. Kneubuehl) в своем исследовании акцентирует внимание на терминологической неточности, присущей ряду работ в области раневой баллистики, и прямо указывает, что «процесс формирования временной полости иногда ошибочно сравнивают с процессом кавитации» [4, с. 95]. Данное замечание еще раз подчеркивает необходимость строгого разграничения понятий «временная полость» и «кавитация».

Таким образом, отсутствие термина «кавитация» в обсуждаемых материалах демонстрирует исключение авторами некор-

ректного использования этого понятия за пределами его физического определения.

Категория Б: работы, где некорректно использован термин «кавитация» и высказаны предположения, что гидродинамическая кавитация является одним из повреждающих факторов.

К этой категории относятся публикации, авторы которых объясняют механизм повреждения биологических тканей, связывая его с кавитационными процессами (*кавитацией*). Например, в книге В.Л. Попова и Е.А. Дыскина отмечается, что «Действие кавитационных сил на биологические ткани приводит к их разрушению, расслоению и разрыву, то есть к нарушению целостности их анатомической структуры» [28, с. 45]. Аналогичная позиция воспроизводится в более поздней работе В.Л. Попова, В.Б. Шигеева и Л.Е. Кузнецова, где авторы без должного критического анализа повторяют тезис о прямой связи *кавитации* с деструкцией тканей [5, с. 60].

М. Фелсманн (M. Felsmann) и соавторы полагают, что временная полость и кавитация действуют совместно и приходят к выводу, что оболочечные пули (FMJ) деформируются и фрагментируются из-за *кавитации* [29, с. 573].

В работе Дж. Пенн-Барвелла (J. Penn-Barwell) и соавторов образование временной полости (ассоциируемой с *кавитацией*) связывается с гидродинамической кавитацией, описанной в исследованиях К. Бреннена [30, с. 313].

Дж. Уилсон (J. Wilson) характеризует механизм формирования временной полости как «образование вакуума в результате быстрого перемещения твердого объекта через газ или жидкость», то есть фактически отождествляет данный процесс с гидродинамической кавитацией [31, с. 52–53].

Подобные подходы можно наблюдать и в других работах, где обсуждаемый термин некорректно используется для объяснения механизма повреждения биологических тканей. Авторы отождествляют гидродинамическую кавитацию (физическое явление в жидкостях) с образованием временной полости при огнестрельных ранениях, игнорируя ключевую роль передачи кинетической энергии и диссипативных процессов. Подобные терминологические и методологические ошибки, включая смешение понятий и упрощенные трактовки, приводят к созданию противоречивых моделей, иска-

жающих понимание механизма образования огнестрельной раны.

Категория В: работы с отождествлением процессов *кавитации* и формирования временной полости.

В обзорном исследовании Ф. Торесби (F. Thoresby) [17], посвященном кавитационным процессам, термин «кавитация» последовательно заключается в кавычки (включая название публикации), что служит маркером для дифференциации описываемого явления от классической гидродинамической кавитации. Со временем данное терминологическое разграничение было утрачено, что повлекло использование термина без семантического разделения указанных явлений.

Л.Б. Озерецковский и соавторы в своей монографии указывают: «Корректный термин, обозначающий явление *кавитации* при прохождении ранящего снаряда через ткани, – “временная пульсирующая полость”» [2, с. 116].

В современных зарубежных публикациях по военной медицине, включая руководство Международного комитета Красного Креста по военной хирургии под авторством С. Джанну и М. Балдана (C. Giannou, M. Baldan) [32], а также учебник армии США по военной медицине, подготовленный Р. Беллами (R. Bellamy) с соавторами [33], имеет место отождествление терминов «временная полость» и «кавитация» при сохранении их связи с процессами передачи энергии. При этом в историографическом разделе американского учебника имеется категорическое отрицание идеи Вудрафа, предположившего идентичность процессов образования полости в биологических тканях и гидродинамической кавитации [33, с. 98].

В статье соавторов под руководством П. Стефанопулоса (P. Stefanopoulos) имеет место терминологическая и методологическая путаница: процессы образования временной полости и *кавитации* рассматриваются как синонимичные. Более того, авторы утверждают, что формирование временной полости детерминировано преимущественно скоростью пули, игнорируя ключевую роль передачи кинетической энергии тканям [34, с. 181–182].

В указанных работах термин «кавитация» используется как синоним динамического процесса образования временной полости – кратковременного расширения тканей, возникающего вследствие передачи

кинетической энергии снаряда. Подобная интерпретация имеется во многих публикациях, однако она не соответствует строгому физическому определению кавитации как явления, связанного с формированием и схлопыванием пузырьков в жидкой среде под действием перепадов давления.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует существенные физические различия между образованием временной полости (*кавитация*) и классической гидродинамической кавитацией. Несмотря на сосуществование данных терминов в научном дискурсе, их семантическая неоднозначность требует разрешения по следующим причинам.

Во-первых, существует *проблема терминологии*. Четкость научного языка – это базовое требование для исключения амбивалентности в научном лексиконе и ошибок интерпретации. В контексте раневой баллистики смешение понятий «кавитация» (гидродинамический процесс) и *кавитация* (временная полость) может привести к некорректным выводам в исследованиях, что особенно критично при изучении механизма образования огнестрельных ранений.

Во-вторых, присутствует *риск смешения концепций*. Использование одного термина для различных явлений создает условия для взаимного наложения концепций и теорий. Как было показано выше, даже исследователи с высокой квалификацией сталкивались с двусмысленностью термина «кавитация». Расширение сферы исследований кавитационных процессов (например, в промышленности и медицине) может только увеличить риск ошибочных аналогий.

В-третьих, нужно учитывать *междисциплинарные противоречия*. Как и в раневой

баллистике, терминологическая неясность может быть источником заблуждений и в гидродинамике. В частности, К. Бреннен (C. Brennen) в статье, посвященной кавитации в медицине, пишет: «Другие предметные области, в которых динамика кавитации считается важной, – это травмы головы и ранения, нанесенные высокоскоростными пулями» [35, с. 5]. При этом он не приводит соответствующих библиографических источников, касающихся огнестрельных ранений. Он лишь отмечает, что механизмы повреждения мозга при травме головы и при его огнестрельном ранении принципиально различны. Это является наглядной иллюстрацией, как близость терминов порождает некорректные ассоциации даже среди специалистов.

В-четвертых, следует принять во внимание *расширение границ научных исследований*. Изучение кавитации, исторически связанное с кораблестроением, в настоящее время охватывает многие области, включая раневую баллистику. Например, исследования влияния пузырьковой кавитации на динамику снарядов, движущихся в водной среде [36], имеют узкоспециализированный характер и не релевантны для изучения механизма образования огнестрельных ранений. Однако отсутствие терминологической ясности затрудняет интерпретацию результатов подобных исследований.

Таким образом, представляется, что для устранения семантической двусмысленности, ошибочных аналогий между физически разнородными процессами и повышения точности междисциплинарных исследований целесообразно исключить из научного языка раневой баллистики термин «кавитация».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Woodruff C.E. The Causes of the Explosive Effect of Modern Small Calibre Bullets // *New York Medical Journal*. 1898. No. 67. P. 593–601.
2. Озеретковский Л.Б., Гуманенко Е.К., Бояринцев В.В. Раневая баллистика. История и современное состояние огнестрельного оружия и средств индивидуальной бронезащиты. Монография. Санкт-Петербург: Журнал «Калашников», 2006. 374 с.
3. Денисов А.В., Анисин А.В., Логаткин С.М., Демченко К.Н., Озеретковский Л.Б. Экспериментальное моделирование в современной раневой баллистике // *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2018. № 2 (62). С. 144–149.

REFERENCES

1. Woodruff C.E. The Causes of the Explosive Effect of Modern Small Calibre Bullets. *New York Medical Journal*. 1898. No. 67. P. 593–601.
2. Ozeretskovsky L.B., Gumanenko E.K., Boyarintsev V.V. *Wound Ballistics. History and Current State of Firearms and Personal Protective Equipment: Monograph*. St. Petersburg: Zhurnal "Kalashnikov", 2006. 374 p. (In Russ.).
3. Denisov A.V., Anisin A.V., Logatkin S.M., Demchenko K.N., Ozeretskovsky L.B. Experimental Modeling in Modern Wound Ballistics. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2018. No. 2 (62). P. 144–149. (In Russ.).

4. Kneubuehl B.P. (Ed.). *Wound Ballistics: Basics and Applications*. Springer-Verlag, 2011. 496 p.
5. Попов В.Л., Шигеев В.Б., Кузнецов Л.Е. Судебно-медицинская баллистика. Санкт-Петербург: Гиппократ, 2002. 656 с.
6. Рождественский В.В. Кавитация. Ленинград: Судостроение, 1977. 248 с.
7. Brennen E.C. *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York: Oxford, 1995. 294 p.
8. Пирсон И. Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.
9. Franc J.P. The Rayleigh-Plesset Equation: a Simple and Powerful Tool to Understand Various Aspects of Cavitation // *Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps, CISM Courses and Lectures*. Springer Wien New York, 2007. No. 496. P. 1–41.
10. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an Initially Spherical Vapor Cavity in the Neighborhood of a Solid Boundary // *Journal of Fluid Mechanics*. 1971. No. 47. P. 283–290. <https://doi.org/10.1017/S0022112071001058>
11. Reisman G.E., Wang Y.C., Brennen C.E. Observations of Shock Waves in Cloud Cavitation // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 335. P. 255–283. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007830>
12. Зубрилов С.П., Растрьгин Н.В. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2019. Т. 11. № 4. С. 705–717.
13. Кузавов В.Т. Эрозионное разрушение материалов в гидродинамической кавитации в новой модели // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 6 (750). С. 101–106.
14. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях / Под ред. У. Мэзона // *Физическая акустика. Т.1: Методы и приборы ультразвуковых исследований* М.: Мир, 1967. С. 7–138.
15. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation Erosion by Single Laser-Produced Bubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 361. P. 75–116. <https://doi.org/10.1017/s0022112098008738>
16. Малюшевская А.П., Малюшевский П.П. Особенности эволюции электроразрядной кавитации в магнитном поле // *Электронная обработка материалов*. 2021. Vol. 57. № 2. С. 25–33. <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.2.25>
17. Thoresby F.P. "Cavitation": The Wounding Process of the High Velocity Missile: A Review // *Journal of the Royal Army Medical Corps*. 1966. Vol. 112 (2). P. 89–100. <https://doi.org/10.1136/jramc-112-02-05>
18. Hill R. Cavitation and the Influence of Headshape in Attack of Thick Targets by Non-deforming Projectiles // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1980. Vol. 28. Iss. 5–6. P. 249–263. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(80\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(80)90019-8)
4. Kneubuehl B.P. (Ed.). *Wound Ballistics: Basics and Applications*. Springer-Verlag, 2011. 496 p.
5. Popov V.L., Shigeev V.B., Kuznetsov L.E. *Forensic Medical Ballistics*. St. Petersburg: Hippocrat, 2002. 656 p. (In Russ.).
6. Rozhdestvensky V.V. *Cavitation*. Leningrad: Sudostroenie, 1977. 248 p. (In Russ.).
7. Brennen E.C. *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York: Oxford, 1995. 294 p.
8. Person I. *Cavitation*. Moscow: Mir, 1975. 95 p. (In Russ.).
9. Franc J.P. The Rayleigh-Plesset Equation: a Simple and Powerful Tool to Understand Various Aspects of Cavitation. *Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps, CISM Courses and Lectures*. Springer Wien New York, 2007. No. 496. P. 1–41.
10. Plesset M.S., Chapman R.B. Collapse of an Initially Spherical Vapor Cavity in the Neighborhood of a Solid Boundary. *Journal of Fluid Mechanics*. 1971. No. 47. P. 283–290. <https://doi.org/10.1017/S0022112071001058>
11. Reisman G.E., Wang Y.C., Brennen C.E. Observations of Shock Waves in Cloud Cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 335. P. 255–283. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007830>
12. Zubrilov S.P., Rastrygin N.V. Studying the Cavitation Process and the Possibility of Reducing Erosive Wear. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*. 2019. Vol. 11. No. 4. P. 705–717. (In Russ.).
13. Kuzavov V.T. Erosive Destruction of Materials in Hydrodynamic Cavitation in a New Model. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021. No. 6 (750). P. 101–106. (In Russ.).
14. Flynn G. Physics of Acoustic Cavitation in Liquids. *Physical Acoustics* Vol. 1: Methods and Devices of Ultrasonic Research / W. Mason (ed.). Moscow: Mir, 1967. P. 7–138. (In Russ.).
15. Philipp A., Lauterborn W. Cavitation Erosion by Single Laser-Produced Bubbles. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 361. P. 75–116. <https://doi.org/10.1017/s0022112098008738>
16. Malyushevskaya A.P., Malyushevsky P.P. Features of the Evolution of Electric Discharge Cavitation in a Magnetic Field. *Electronic Processing of Materials*. 2021. Vol. 57. No. 2. P. 25–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.2.25>
17. Thoresby F.P. "Cavitation": The Wounding Process of the High Velocity Missile: A Review. *Journal of the Royal Army Medical Corps*. 1966. Vol. 112 (2). P. 89–100. <https://doi.org/10.1136/jramc-112-02-05>
18. Hill R. Cavitation and the Influence of Headshape in Attack of Thick Targets by Non-deforming Projectiles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1980. Vol. 28. Iss. 5–6. P. 249–263. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(80\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(80)90019-8)

19. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag, 2012. 323 p.
20. Эйдли Л.М. Огнестрельные повреждения. Воронеж: Воронежское областное книгоиздательство, 1939. 226 с.
21. Эйдли Л.М. Огнестрельные повреждения. Врачебное и криминалистическое распознавание и оценка. Ташкент: Государственное медицинское издательство Министерства здравоохранения УзССР, 1963. 326 с.
22. Di Maio V.J.M. *Gunshot Wounds. Practical Aspects of Firearms, Ballistics, and Forensic Techniques*. 2nd ed. New York: Boca Raton, 1999. 401 p.
23. Schyma C., Madea B. Evaluation of the Temporary Cavity in Ordnance Gelatin // *Forensic Science International*. 2012. Vol. 214. Iss. 1–3. P. 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.07.021>
24. Военно-полевая хирургия. Учебник. 2-е изд., изм. и доп. / Под ред. Е.К. Гумаренко. М.: ГЭ-ОТАР-Медиа, 2008. 768 с.
25. Судебно-медицинская травматология / Под ред. А.П. Громова, В.Г. Науменко. М.: Медицина, 1977. 368 с.
26. Хохлов В.В., Кузнецов Л.Е. Судебная медицина: руководство. Смоленск, 1998. 800 с.
27. Леонов С.В., Пинчук П.В., Гусева С.В. Особенности повреждающего действия охотничьих патронов, выстрелянных из карабина КО-98М1 // *Судебная медицина*. 2021. Т. 7. № 2. С. 108–112. <https://doi.org/10.17816/fm341>
28. Попов В.Л., Дыскин Е.А. Раневая баллистика. Труды Военно-медицинской академии. Т. 234. Санкт-Петербург: Военно-медицинская академия, 1994. 161 с.
29. Felsmann M.Z., Szarek J., Felsmann M., Babinska I. Factors Affecting Temporary Cavity Generation During Gunshot Wound Formation in Animals New Aspects in the Light of Flow Mechanics: A Review // *Veterinárni Medicína*. 2012. No. 57 (11). P. 569–574. <https://doi.org/10.17221/6463-VETMED>
30. Penn-Barwell J.G., Brown K.V., Fries A.F. High Velocity Gunshot Injuries to the Extremities: Management on and off the Battlefield // *Current Reviews Musculoskeletal Medicine*. 2015. Vol. 8. P. 312–317. <https://doi.org/10.1007/s12178-015-9289-4>
31. Wilson J.M. *Wound Ballistics* // *Western Journal of Medicine*. 1977. No. 127. P. 49–54.
32. Giannou C., Baldan M. *War Surgery*. Vol. 1 Geneva: International Committee of the Red Cross, 2010. 353 p.
33. Bellamy R.F. [et al]. *Conventional Warfare: Ballistic, Blast, and Burn Injuries*. Office of the Surgeon General, 1991. 396 p.
34. Stefanopoulos P.K., Hadjigeorgiou G.F., Filippakis K., Gyftokostas D. Gunshot Wounds: A Review of Ballistics Related to Penetrating Trauma // *Journal of Acute Disease*. 2014. Vol. 3. Iss. 3. P. 178–185. [https://doi.org/10.1016/S2221-6189\(14\)60041-X](https://doi.org/10.1016/S2221-6189(14)60041-X)
19. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistics*. Springer-Verlag, 2012. 323 p.
20. Eidlin L.M. *Gunshot Wounds*. Voronezh: Voronezhskoe oblastnoe knigoizdatel'stvo, 1939. 226 p. (In Russ.).
21. Eidlin L.M. *Gunshot Wounds. Medical and Criminalistic Insight and Assessment*. Tashkent: Gosudarstvennoe meditsinskoe izdatel'stvo Ministerstva zdravookhraneniya UzSSR, 1963. 326 p. (In Russ.).
22. Di Maio V.J.M. *Gunshot Wounds. Practical Aspects of Firearms, Ballistics, and Forensic Techniques*. 2nd ed. New York: Boca Raton, 1999. 401 p.
23. Schyma C., Madea B. Evaluation of the Temporary Cavity in Ordnance Gelatin. *Forensic Science International*. 2012. Vol. 214. Iss. 1–3. P. 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.07.021>
24. *Military-Field Surgery. Textbook*. 2nd ed. / E.K. Gumarenko (ed.). Moscow: GEOTAR-Media, 2008. 768 p. (In Russ.)
25. Gromov A.P., Naumenko V.G. (Eds.). *Forensic Traumatology*. Moscow: Meditsina, 1977. 368 p. (In Russ.).
26. Khokhlov V.V., Kuznetsov L.E. *Forensic Medicine: Study Guide*. Smolensk, 1998. 800 p. (In Russ.).
27. Leonov S.V., Pinchuk P.V., Guseva S.V. Features of the Damaging Effect of Hunting Cartridges Fired from the KO-98M1 Carbine. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2021. Vol. 7. Iss. 2. P. 108–112. <https://doi.org/10.17816/fm341>
28. Popov V.L., Dyskin E.A. *Wound Ballistics. Proceedings of the Military Medical Academy*. Vol. 234. St. Petersburg: Voenno-meditsinskaya akademiya, 1994. 161 p. (In Russ.).
29. Felsmann M.Z., Szarek J., Felsmann M., Babinska I. Factors Affecting Temporary Cavity Generation During Gunshot Wound Formation in Animals New Aspects in the Light of Flow Mechanics: A Review. *Veterinárni Medicína*. 2012. No. 57 (11). P. 569–574. <https://doi.org/10.17221/6463-VETMED>
30. Penn-Barwell J.G., Brown K.V., Fries A.F. High Velocity Gunshot Injuries to the Extremities: Management on and off the Battlefield. *Current Reviews Musculoskeletal Medicine*. 2015. Vol. 8. P. 312–317. <https://doi.org/10.1007/s12178-015-9289-4>
31. Wilson J.M. *Wound Ballistics*. *Western Journal of Medicine*. 1977. No. 127. P. 49–54.
32. Giannou C., Baldan M. *War Surgery*. Vol. 1 Geneva: International Committee of the Red Cross, 2010. 353 p.
33. Bellamy R.F. et al. *Conventional Warfare: Ballistic, Blast, and Burn Injuries*. Office of the Surgeon General, 1991. 396 p.
34. Stefanopoulos P.K., Hadjigeorgiou G.F., Filippakis K., Gyftokostas D. Gunshot Wounds: A Review of Ballistics Related to Penetrating Trauma. *Journal of Acute Disease*. 2014. Vol. 3. Iss. 3. P. 178–185. [https://doi.org/10.1016/S2221-6189\(14\)60041-X](https://doi.org/10.1016/S2221-6189(14)60041-X)

35. Brennen C.E. Cavitation in Medicine // *Interface Focus*. 2015. No. 5 (5). P. 1–12.
<https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0022>
36. Wang Y., Liao L., Du T., Huang C., Liu Y., Fang X., Liang N.A. Study on the Collapse of Cavitation Bubbles Surrounding the Underwater-Launched Projectile and its Fluid-Structure Coupling Effects // *Ocean Engineering*. 2014. No. 84. P. 228–236.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.04.01>
35. Brennen C.E. Cavitation in Medicine. *Interface Focus*. 2015. No. 5 (5). P. 1–12.
<https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0022>
36. Wang Y., Liao L., Du T., Huang C., Liu Y., Fang X., Liang N.A. Study on the Collapse of Cavitation Bubbles Surrounding the Underwater-Launched Projectile and its Fluid-Structure Coupling Effects. *Ocean Engineering*. 2014. No. 84. P. 228–236.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.04.01>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кокин Андрей Васильевич – д. юр. н., главный государственный судебный эксперт отдела трасологической и баллистической экспертизы ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России; профессор кафедры оружейведения и трасологии учебно-научного комплекса судебной экспертизы Московского университета МВД России имени В.Я. Кикотя;
e-mail: sbl@sudexpert.ru

ABOUT THE AUTHOR

Kokin Andrey Vasil'evich – D. Sc. (Law), Chief Forensic Expert at the Department of Toolmarks and Ballistics Examinations of the Russian Federal Centre of Forensic Science named after professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation; Professor of Department of Weapons and Toolmarks Examinations at Educational and Scientific Forensic Complex of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation; e-mail: sbl@sudexpert.ru

Статья поступила: 20.10.2025

После доработки: 15.12.2025

Принята к печати: 30.01.2026

Received: October 20, 2025

Revised: December 15, 2025

Accepted: January 30, 2026