

П.В. Пивень

Алтайский государственный университет, г. Барнаул (Россия)

**НЕГАТИВНЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВОДОТОКАХ
НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЙСКОГО КРАЯ
И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ**

Аннотация. В статье рассматриваются кавитационные эффекты в прибрежных зонах. Обосновывается, что воздействие водных потоков на горные породы может иметь характер микрокумулятивных струй, образующихся при схлопывании кавитационного пузыря, а на подстилающую его поверхность, может оказываться, электрохимическое, термическое, а также ударное воздействие, не только, собственно, жидкостью, но и находившимися на поверхности пузыря частицами взвесей. Приводятся примеры по негативным эффектам кавитационного разрушения и мер по борьбе с ним, а также о его возможном использовании в хозяйственных целях.

Ключевые слова: кавитация, эрозия, эврозия, каверны, гидротехнические сооружения.

P.V. Piven

Altai State University, Barnaul (Russia)

**NEGATIVE CAVITATION EFFECTS IN WATERCOURSES IN THE
ALTAI REGION AND MEASURES TO COMBAT THEM**

Abstract. The article deals with cavitation effects in coastal zones. It is substantiated that the impact of water flows on rocks may have the character of micro cumulative jets formed during the collapse of the cavitation bubble, and on its underlying surface, may have, electrochemical, thermal, as well as impact effects, not only the liquid itself, but also the particles of suspended matter located on the surface of the bubble. Examples of the negative consequences of cavitation destruction and measures to combat it, as well as its possible use for economic purposes are given.

Keywords: cavitation, erosion, eversion, caverns, hydraulic structures.

В научной литературе процессам кавитационного разрушения горных пород отведено довольно скромное место. Как правило, его связывают лишь с ударным давлением на подстилающую поверхность, возникающим при схлопывании кавитационных полостей. В частности, такая точка зрения представлена в работах Н.В. Есина, М.Т. Савина, А.П. Жилаева, П.А. Каплина, О.К. Леонтьева, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифорова, Г.А. Сафьянова. В частности, Г.А. Сафьянов прямо констатирует: «Значение кавитационных явлений по-видимому невелико, сравнительно с другой разновидностью механической абразии» [13, с. 104].

Вместе с тем, кавитационные эффекты могут носить куда более сложный характер. Их роль в эрозионных процессах может быть недооценена. Доказательством тому служит тот факт, что были созданы кавитационные генераторы буровых снарядов, позволившие, по сравнению с традиционным способом, увеличить скорость бурения скважин до 70%, при снижении износа инструмента и энергозатрат на 15-20 % [6].

Бурение – частный случай антропогенного разрушения горных пород. В природных условиях действуют те же законы физики. Кавитационное разрушение горных пород, чаще всего, рассматривается лишь как частный случай механической абразии. Но не может ли она проявляться одновременно и с другими ее вариантами: химической и термической абразией?

Принято считать, что кавитационные эффекты, в природных условиях, наблюдаются при достижении водными потоками скорости в 14-16 м/сек и выше [13, с. 107].

В силу этого, кавитационное воздействие на горные породы рассматривают, как правило, в основном, в связи с разрушительной деятельностью морей. Вместе с тем, и на реках можно найти участки, где оно также представлено (визуально – по пенящейся воде): водопады, водовороты, шиверы, пороги и другие препятствия (например, полузатонувшие стволы деревьев). При этом, на реках – эффекты кавитации можно наблюдать при значительно более низкой скорости течения водных потоков. Например, на Днепровских порогах, она составляла до 4 м/с [7].

Это означает, что, как в реках, так и в морях кавитационные эффекты также могут проявляться при более низких скоростях водных потоков (например, в ныряющих бурунах, над рифами; на участках, где имеются препятствия для водного потока в речном русле). Иными словами, должна возникнуть ситуация гидравлического прыжка на границе бурного (турбулентного) и спокойного (ламинарного) течения. Именно эта пограничная зона и является местом проявления кавитационных явлений, возникновения и схлопывания кавитационных пузырей, проявляющихся в виде серий пульсаций, приводящих к разрушению даже прочных горных пород.

Следует отметить, что в геологическом прошлом нашей планеты, в частности, в последнем позднеледниковье, процессы кавитационной эрозии протекали столь интенсивно, что следы ее воздействия на горные породы можно увидеть и в наши дни. Например, в Британской Колумбии, имеются субквальные кавитационные котлы на территории Channeled Scabland (в каналах-каньонах), возникшие в ходе дилювиальной эвразии. Подобные образования имеются и на территории Алтая. Если следовать логике А.Н. Рудого, дилювиальную эвразию правильнее было бы называть дилювиально-эвразийно-кавитационной [12].

На территории Алтайского края такие формы рельефа, как ложбины древнего стока, были сформированы, в том числе, и спиллвеями, а данные высокоэнергетические водные потоки имели турбулентный характер, в них наблюдались водовороты, а значит, могли формироваться дилювиально-эвразийно-кавитационные формы рельефа, которые могли быть впоследствии погребены новейшими отложениями, или разрушены последующими эрозионными процессами. На территории Алтайского края кавитационно-эвразийный генезис имеет котловина озера Ая (в Алтайском районе). Широкою известность приобрели образованные фладстримом знаки гигантской ряби течения в районе села Платово (Советского района). Ложбины древнего стока на территории Алтайского края также имеют следы формирования фладстримами.

В частности, на Кулундинской равнине, в них имеются бугры каплевидной формы (схожей с островами-осередками), широкой частью (приверхом) обращенные на северо-восток, а узкой (ухвостьем) – на юго-запад. Аналогичное, юго-западное направление имеют и дельты ложбин древнего стока [1, 4, 9, 12, 14].

Это служит дополнительным доказательством тому, что процессы кавитационной эрозии не следует недооценивать. Пусть и с многократно меньшей силой, они могут проявлять себя как в естественных, так и в искусственных водотоках и в настоящее время. Рассмотрим, какие горные породы ей могут теоретически дольше всего противостоять.

Проявления кавитационной эрозии могут происходить очень быстро, в течении минут. Твердость, как и предел прочности материала – не являются решающими. Например, проводились эксперименты, в ходе которых было установлено, что за одно и то же время процесса кавитационной эрозии образец из коррозионностойкой, жаропрочной стали марки 09X18H10T (1X18H10T) получил повреждения глубиной до 4 мм, а поверхность образца из полиэтилена остался целой [11].

Таким образом, следует полагать, что наибольшее сопротивление к кавитационной эрозии могут проявлять вязкие, растяжимые, пластичные материалы, имеющие высокие антифрикционные свойства, по сравнению с твердыми и хрупкими материалами, имеющими большой коэффициент трения.

Рассмотрим подробнее эффекты, которые могут возникать при схлопывании кавитационного пузыря. В природных условиях наблюдается гидродинамическая кавитация, возникающая при локальном уменьшении давления в жидкости, при увеличении скорости водного потока. Вместе с водными струями, возникшие кавитационные пузыри оказываются в областях с более высоким давлением (у препятствий) и притягиваются к их поверхностям на границе раздела фаз «воздух-жидкость». Следует полагать, что к неровной поверхности их пристанет значительно больше (например, пористые, трещиноватые горные породы, или полиминеральные, состоящие из минералов различной твердости).

Помимо, собственно, ударной волны, воздействующей на подстилающую поверхность, возникающей при схлопывании кавитационного пузыря, следует также учитывать возможность наличия минеральных частиц на поверхности пузыря, оказывающих на горные породы дополнительное воздействие, подобно ударам наконечника отбойного молотка. Вместе с тем, кавитационные струи имеют турбулентный характер, закручиваются и захваченные ими минеральные частицы способны высверливать микролунки, которые могут постепенно углубляться, расширяться, сливаться друг с другом, постепенно создавая ячеистую поверхность.

Также, при схлопывании кавитационных пузырей возможно проявление баллоэлектрического эффекта, проявляющегося и в гидродинамической люминесценции. В таком случае, это может быть подобно (пусть и в многократно меньшем воздействии), применяющемуся при электроимпульсном бурении скважин электрическом пробое, при котором, на прочные горные

породы, имеющие высокое электрическое сопротивление, оказывается разрушающее воздействие за счет электрогидравлического эффекта, что также может усиливать ударную волну при схлопывании пузырей. Это, в свою очередь, должно приводить к локальным, точечным, резким нагревам участков подстилающей пузырь поверхности, что может провоцировать процессы термического выветривания. Опытным путем Н. Маринеско показал, достигаемая при коллапсе кавитационного пузыря температура может быть более 200 °С [15].

Таким образом, все это способствует откалыванию частиц горных пород, а их изъязвленная поверхность становится все более шероховатой, что провоцирует большее «прилипание» пузырьков газа (трещиноватые, неровные поверхности выступают, как ловушки для пузырьков газа), а в следствии этого – способствует росту кавитационной эрозии. Для защиты от электрического микропробоя следует использовать покрытия на основе несмачиваемых гидрофобных диэлектриков.

Где же на территории Алтайского края, помимо горных рек с бурным течением, таких, как: Кумир, Коргон, Северный Тогул, Гремишка, Громотуха (приток Ини) и других, могут проявляться кавитационные явления? Она может наблюдаться в водотоках искусственного происхождения. Например, у водосброса «Бийской ТЭЦ-1», которая работает без градирни и имеет прямоточную систему водного охлаждения. К подобным объектам можно отнести и паводковые водосбросы, а также донные выпуски плотин (Гилевского, Шипуновского, Склюихинского, Правдинского водохранилищ), консольные водосбросы барнаульского, бийского водоканалов и т.п. Эти технические сооружения способствуют формированию водных потоков с сильным течением, способствующим формированию кавитационных пузырей, при коллапсе которых происходит разрушение подстилающих поверхностей. Бетонные сооружения изъязвляются, что способствует проникновению воды внутрь материала. Арматура начинает активнее ржаветь, а сформировавшиеся слои оксидов железа имеют рыхлую структуру, что увеличивает ее в объеме, способствуя растрескиванию железобетонных конструкций (эффект расклинивания), с возможным последующим их разрушением. А ведь при разрушении донных выпусков плотина может обрушиться, а контроль их состояния и возможный ремонт – весьма затруднены. В месте падения вод с водосбросов, на дне можно обнаружить водобойные ямы и даже если данное сооружение имело водобойный колодец, то и он оказывается подвержен воздействию негативных кавитационных явлений и может иметь эрозионные формы, аналогичные эвронным стаканам и котлам-колодцам у природных водопадов.

На территории Алтайского края, с советского периода, насчитывалось около 2500 водохранилищ. В федеральной собственности – лишь 9 из них и именно за ними осуществляется должный технический надзор и поддержание в рабочем состоянии. Остальные же, в большинстве своем, принадлежали прекратившим свое существование в постсоветское время совхозам и колхозам. Таким образом, большая часть данных гидротехнических сооружений, по сути,

оказалась бесхозной. Главному управлению природных ресурсов Алтайского края оказалось поднадзорно лишь 222 гидротехнических сооружения из 2500. Это привело к тому, что, уже к 2003 г., более 60% плотин на малых реках края находилось в неудовлетворительном состоянии, в аварийном же состоянии – около 30% [10, с. 45, 102]

В 2010 г. в Алтайском крае насчитывалось 240 гидротехнических сооружения (в том числе, 219 – бесхозных) [2].

В 2017 г. Сотрудники ИВЭП опубликовали работу, в которой были приведены данные об инвентаризации гидротехнических сооружений, в степной части края, на притоках реки Алей. Исследование 27 гидротехнических сооружений показало, что большая часть из них находится в неудовлетворительном состоянии, бесхозные водоемы подверглись процессам эвтрофикации, превратившись в болота, часть плотин оказалась разрушена, а вода спущена. Ложе бывших прудов оказалось покрыто древесно-кустарниковой растительностью, имеющей примерный возраст 15-17 лет [5, с. 63, 66].

Общее количество поднадзорных Ростехнадзору гидротехнических сооружений на территории Алтайского края, к 2018 г., составило 53 [3, с. 130].

Еще в соответствии со сталинским планом преобразования природы, в степных условиях, пруды являлись структурным элементом лесополос. Утрата данных водоемов способствует снижению обводненности территории, понижению уровня грунтовых вод вблизи них, усыханию лесонасаждений. Вместе с тем, спуск воды из бесхозных прудов снижает риски возникновения чрезвычайных ситуаций, когда паводковые воды могли бы разрушить обветшавшие гидротехнические сооружения на одной плотине, а далее, вниз по течению реки, на которой она находилась, могла бы пойти волна, схожая с миниспиллвеем, вызывающая, по принципу цепной реакции, разрушение нижележащих плотин и, по мере захвата все новых объемов воды из уничтоженных прудов, увеличиваясь в арифметической прогрессии. Это могло бы привести к катастрофическим явлениям, в том числе, с возникновением диллювиально-эвразийно-кавитационных форм рельефа. В настоящее время, большая часть такого советского наследия, как колхозные и совхозные пруды на малых реках края – оказалась утрачена, катастрофические сценарии каскадного прорыва плотин: практически исключены.

Где же, в таком случае, в агроландшафтах, можно еще столкнуться с проявлениями кавитации? Пока еще действуют каналы: Кулундинский, Бурлинский, а также Алейской оросительной систем. На насосных станциях данных гидротехнических сооружений, а также участках, где русло водного потока сужается, возможны негативные проявления кавитации.

В частности, вдоль трассы Кулундинского канала, на его откосах, образовались такие эрозионные формы, как промоины и борозды, имеющие ширину до 3 м и глубину – до 1,5 м [8, с. 35].

Кавитационному разрушению могут подвергаться и быки опор мостов (наиболее активно – в половодье). Страдают от него и поверхности гребных винтов, при образовании кавитационных каверн на которых даже возможна поломка их лопастей.

В горнодобычных районах, на юго-западе Алтайского края, кавитация проявляется в шахтных насосах и в сбросных коллекторах (в частности, на Корболихинском руднике (в Змеиногорском районе)).

Столкнуться с негативными явлениями кавитации возможно в отопительных системах парового отопления, водопроводных и канализационных системах. В первую очередь, в обеспечивающих их работу насосах, а также на тех участках трубопроводов, где нарушается сплошность потока, например, на нисходящих ветвях, резких изгибах, приводящих к его турбулизации. Разрушение элементов данных систем кавитационной эрозией может привести не только к экономическому, но и экологическому ущербу (в частности, при аварийном сбросе неочищенных сточных вод). Канализационные шахты также оказываются одними из наиболее уязвимых структур для кавитационной эрозии (например, участке отражающей поверхности стенки шахты, на которую приходится падение потока сброшенных сточных вод могут вначале появляться шероховатости, затем углубления, вплоть до сквозных отверстий в железобетонных конструкциях, вокруг которых начинают разрастаться трещины и происходит отслоение слоев бетона и бетона от арматуры.

Также, одними из самых уязвимых, для кавитационного разрушения, будут являться элементы, относящиеся к запорной арматуре систем водоснабжения и водоотведения (задвижки, вентили, запорные клапаны и т.п.).

Таким образом, кавитационные процессы как в естественных, так и в искусственных водотоках – представлены довольно широко. Они могут играть не только отрицательную, но и положительную роль. Например, как уже было указано выше, они могут использоваться для бурения скважин, а также для очистки поверхностей технических сооружений от обрастаний, или для очистки сточных вод (холодное «кипение» воды, при котором патогенные микроорганизмы буквально перемалываются при коллапсе кавитационных пузырьков, а механические примеси разбиваются на мелкодисперсные фракции, что позволяет ускорить процессы последующих этапов водоочистки и повысить ее эффективность). Кавитаторы используются и при переработке нефти и нефтепродуктов, могут они применяться и для гомогенизации пищевых продуктов и медицинских препаратов. Негативные же эффекты кавитации, чаще всего, проявляют себя, как следствие ошибок при проектировании технических объектов, или при нарушении регламентов их эксплуатации.

Защитить наиболее уязвимые поверхности от кавитационного разрушения возможно покрытием их специальными материалами. Например, композиционным материалом (фибропластиком) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, армированного волокнами волластонита, или карборунда. Такое покрытие может быть использовано даже для ледорезов быков моста, ведь этот материал обладает высокой износостойкостью (в том числе, к истиранию), высокой ударной вязкостью (даже при низких температурах), высокой прочностью, может свариваться (высокая ремонтпригодность), имеет низкий коэффициент трения, низкую адгезию и

водопоглощение. Вместе с тем, он физиологически инертен и стоек к химически агрессивным средам, обладает диэлектрическими свойствами.

Таким образом, действуя в соответствии с принципами рационального природопользования, можно избежать негативных эффектов кавитационных процессов и использовать их во благо.

Библиографический список

1. Барышников Г.Я. Водокаменные сели Горного Алтая в неоплейстоцене. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе – Хорог, Таджикистан) / Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. – т. 1. – с. 355 - 362.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2010 году». – М.: НИА-Природа, 2011. – 274 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – М.: НИА-Природа, 2019. – 290 с.
4. Гросвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики. – М.: Научный мир, 1999. – 120 с.
5. Губарев М.С., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В. Инвентаризация состояния прудов на притоках реки Алей в степной зоне Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (152). – с. 61 - 68.
6. Дзоз Н.А., Жулай Ю.А. Интенсификация процессов бурения с использованием гидродинамической кавитации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 4. – с. 290 - 296.
7. Днепровские пороги // Большой энциклопедический словарь. – URL: <https://www.vedu.ru/bigencdic/19367/>.
8. Земцов А.А., Земцов В.А. Антропогенная степей на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы – 1996. – №4 – с. 28 - 37.
9. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Томский государственный университет, 2008. – 288 с.
10. Материалы к Государственному докладу о состоянии и использовании водных ресурсов Алтайского края в 2003 году. – Барнаул: Изд-во “Алтайна”, 2004. – 112 с.
11. Пылаев Н.И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах. – Л.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
12. Рудой А.Н. Скэбленды – экзотические ландшафты последнего позднеледникового // Сборник научных трудов Sworld. – т. 36. – № 4. – Одесса: ООО "Научный Мир", 2011. – с. 9 - 11.
13. Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов. – М.: МГУ, 1996. – 406 с.
14. Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N. Paleohydrology of Late Pleistocene Superflooding, Altai Mountains, Siberia. // Science, 1993. – vol. 259. – p. 348 - 350.
15. Marinenco N. Deflagration des substances explosives par les ultrasons // Comptes Rendus Academie Sciences. – Paris, 1935. – vol. 201. – p. 1187 - 1189.

References

1. Baryshnikov G.Ja. Vodokamennye seli Gornogo Altaja v neoplejstocene. V sb.: Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashhita. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii (Dushanbe – Horog, Tadzhikistan). / Otv. red. S.S. Chernomorec, K.S. Vishadzhieva. – Dushanbe: OOO «Promoushn», 2020. – vol. 1. – p.p. 355 - 362.
2. Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ispol'zovanii vodnyh resursov Rossijskoj Federacii v 2010 godu». – M.: NIA-Priroda, 2011. – 274 p.
3. Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ispol'zovanii vodnyh resursov Rossijskoj Federacii v 2018 godu». – M.: NIA-Priroda, 2019. – 290 p.
4. Grosval'd M.G. Evrazijskie gidrosfernye katastrofy i oledenenie Arktiki. – M.: Nauchnyj mir, 1999. – 120 p.
5. Gubarev M.S., Rybkina I.D., Stojashheva N.V. Inventarizacija sostojanija prudov na pritokah reki Alej v stepnoj zone Altajskogo kraja // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – № 6 (152). – p. 61 - 68.
6. Dzoz N.A., Zhulaj Ju.A. Intensifikacija processov burenija s ispol'zovaniem gidrodinamicheskoj kavitacii // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. – 2008. – № 4. – p.p. 290 - 296.
7. Dneprovskie porogi // Bol'shoj jenciklopedicheskij slovar'. – URL: <https://www.vedu.ru/bigenctic/19367/>.
8. Zemcov A.A., Zemcov V.A. Antropogenizacija stepej na juge Zapadno-Sibirskoj ravniny // Geografija i prirodnye resursy – 1996. – №4 – p.p. 28 - 37.
9. Maloletko A.M. Jevoljucija rechnyh sistem Zapadnoj Sibiri v mezozoe i kajnozoe. – Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2008. – 288 p.
10. Materialy k Gosudarstvennomu dokladu o sostojanii i ispol'zovanii vodnyh resursov Altajskogo kraja v 2003 godu. – Barnaul: Izd-vo “Altajna”, 2004. – 112 p.
11. Pylaev N.I., Jedel' Ju.U. Kavitacija v gidroturbinah. – L.: Mashinostroenie, 1974. – 256 p.
12. Rudoj A.N. Skjeblyndy – jekzoticheskie landshafty poslednego pozdnelednikov'ja // Sbornik nauchnyh trudov Sworld. – vol. 36. – № 4. – Odessa: OOO "Nauchnyj Mir", 2011. – p.p. 9 - 11.
13. Saf'janov G.A. Geomorfologija morskikh beregov. – M.: MGU, 1996. – 406 p.
14. Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N. Paleohydrology of Late Pleistocene Superflooding, Altai Mountains, Siberia. // Science, 1993. – vol. 259. – p.p. 348 - 350.
15. Marinesco N. Deflagration des substances explosives par les ultrasons // Comptes Rendus Academie Sciences. – Paris, 1935. – vol. 201. – p.p. 1187 - 1189.

Информация об авторе:

Пивень Павел Владиславович, к. филос. н., доцент каф. природопользования и геоэкологии, Алтайский государственный университет. Тел.: (3852) 291-279; почтовый индекс: 656049, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 61 E-mail: piven@mc.asu.ru.

Information about the author:

Piven Pavel Vladislavovich, candidate of philosophical sciences, Assoc. Prof., Chair of Natural Resources Mgmt. and GeoEcology, Altai State University. Ph.: (3852) 291-279; postal code: 656049, Altai State, Barnaul city, Lenin Ave., 61; E-mail: piven@mc.asu.ru.