

Н. Д. КРАСНИКОВ

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В практике строительства и эксплуатации гидросооружений часто возникают вопросы, связанные с необходимостью оценки их «взрывостойкости», т. е. с определением прочности и устойчивости этих сооружений при воздействии на них динамических нагрузок от различного рода промышленных взрывов. Такие вопросы могут возникать, например, при проведении вблизи от существующих гидросооружений взрывных подводно-технических работ с целью дноуглубления [2], уплотнения подводных песчаных и каменных насыпей [5]; при разработке взрывным способом карьеров, располагающихся на сравнительно небольшом удалении от гидросооружений [7]; при возведении плотин и насыпей из местных материалов с помощью направленных взрывов и т. п.

В указанных случаях нередко возникает необходимость оценки воздействия взрывов как на сами гидросооружения или их элементы, так и на основания рассматриваемых сооружений. В настоящее время оценка сейсмической опасности взрывов для близко расположенных зданий и сооружений производится с помощью эмпирических методов, основанных на обобщении и анализе данных наблюдений за повреждениями и разрушениями различных зданий и сооружений при промышленных взрывах.

Как показали исследования М. А. Садовского [11, 13], наиболее подходящим критерием для оценки сейсмической опасности взрывов является скорость смещений грунта в главной фазе колебаний в месте расположения рассматриваемых сооружений. Это обусловлено тем, что скорость колебаний является более устойчивой характеристикой сейсмического эффекта взрывов [11, 13]. Кроме того, деформации элементов сооружения при его колебаниях возрастают примерно пропорционально корню квадратному из энергии (и соответственно пропорционально первой степени скорости) колебаний. Результаты наблюдений показывают [11, 13], что существует прямая зависимость между степенью повреждения сооружений и скоростью колебаний грунтов при взрывах, в то время, как для амплитуд смещений и ускорений такой зависимости не наблюдается.

При этом ни в одном из случаев, когда значения скорости колебаний грунтов были меньше 12—14 см/сек, не отмечалось каких-либо раз-

рушений или повреждений жилых зданий и промышленных сооружений наиболее распространенных типов, что позволило принять указанную величину скорости в качестве максимально допустимого ее значения при определении радиуса сейсмически безопасных зон [4]. По данным ряда авторов [15], при часто повторяющихся взрывах величина максимально допустимой скорости колебаний грунта должна понижаться до 2—3 см/сек.

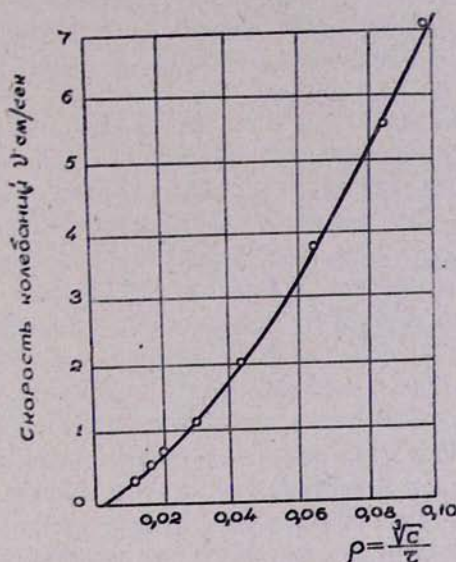


Рис. 1. График скорости частиц грунта в главной фазе колебаний

При проведении взрывных дноуглубительных работ вблизи массивного бетонного гидросооружения (стенки набережной), расположенного на прочном скальном основании, не наблюдалось каких-либо повреждений этого сооружения при максимальных значениях скорости его колебаний, достигавшей 25—30 см/сек [2]. На рис. 1 по осредненным опытным данным для исследовавшихся видов грунтов [11, 13] приведен график зависимости скорости частиц грунта в главной фазе колебаний от параметра $\rho = \sqrt[3]{c}/r$, где r — расстояние до места взрывов в метрах, c — вес заряда ВВ в килограммах.

В соответствии с действующими указаниями [4] приближенная оценка радиусов сейсмически безопасных зон обычно производится по формуле

$$r_c = k_c \alpha \sqrt[3]{c} \quad (1)$$

где r_c — радиус сейсмически безопасной зоны в метрах;

c — вес заряда ВВ в килограммах;

α — коэффициент, зависящий от показателя горна n ;

k_c — коэффициент, зависящий от свойств грунтов и изменяющийся в пределах от 3,0 — для прочных скальных пород, до 20,0 — для слабых водонасыщенных грунтов (плывунов и торфа).

За рубежом при использовании метода Горного бюро США [3, 16 и др.] в качестве критерия сейсмической опасности взрывов принимается величина максимального ускорения колебаний грунта. При этом, по имеющимся данным, нижней границе, при которой не наблюдается никаких повреждений зданий и сооружений, соответствует ускорение грунта, равное 0,1 g. При ускорениях колебаний в пределах от 0,1 до 1,0 g, отвечающих «зоне предосторожности», возможны некоторые незначительные повреждения зданий и сооружений. Верхней границе, при которой могут наблюдаться значительные повреждения и разрушение зданий и сооружений, соответствуют ускорения, равные или большие 1,0 g (где g — ускорение силы тяжести). Однако последующие наблюдения показали непригодность величины ускорения в качестве критерия для оценки сейсмической опасности взрывов [3, 16]. Это видно, например, из того, что в случае землетрясений уже при ускорениях порядка 0,1 g часто наблюдаются [3] сильные повреждения зданий и сооружений. Обычно при колебаниях, вызванных любым источником, независимо от абсолютной величины ускорения, не наблюдается никаких повреждений зданий и сооружений до тех пор, пока энергия колебаний не достигнет определенных значений. В соответствии с этим Кранделлом был предложен метод [3, 16], согласно которому в качестве критерия при оценке сейсмической опасности взрывов используется так называемый «энергетический коэффициент»:

$$q = \frac{a^2}{f^2}, \quad (2)$$

где a — ускорение в м/сек² и f — частота колебаний. Этот коэффициент представляет собой величину, пропорциональную квадрату скорости колебаний, а следовательно, пропорциональную их кинетической энергии. По полученным опытным данным [16], при значениях $q < 0,28$, отвечающих «зоне безопасности», обычно не наблюдается никаких повреждений зданий и сооружений. В диапазоне значений $0,28 \leq q \leq 0,56$, отвечающих «зоне предосторожности», могут наблюдаться некоторые их повреждения, а при значениях $q > 0,56$, соответствующих «опасной зоне», могут наблюдаться сильные повреждения и разрушение зданий и сооружений. На рис. 2 показаны графики [16] для определения сейсмически безопасных зон взрыва в зависимости от величины ускорения колебаний грунта a и энергетического коэффициента q . Для практического использования этих графиков необходимо дополнительно располагать данными об ожидаемых параметрах колебаний грунтов (амплитудах смещений и ускорений, частотах колебаний и др.) в месте расположения сооружений, обусловленных взрывами. Последние могут быть найдены по резуль-

татам специальных полевых исследований либо с помощью существующих эмпирических зависимостей [16].

Рассмотренные выше методы применяются при оценке сейсмической опасности взрывов лишь для обычных жилых зданий, а также некоторых наиболее распространенных типов промышленных сооружений и являются непригодными при решении аналогичных вопросов для гидротехнических сооружений. Это обусловлено тем, что все фактические данные о разрушительном воздействии сейсмического эффекта взрывов получены в результате соответствующих наблюдений за поведением обычных жилых зданий и промышленных сооружений. Аналогичных

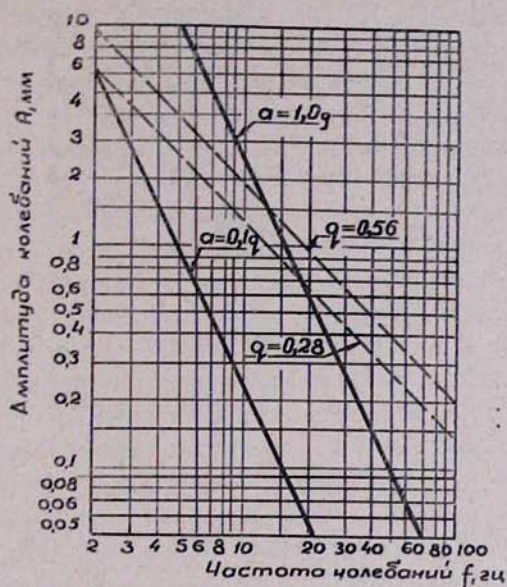


Рис. 2. График определения сейсмически безопасных зон взрыва в зависимости от ускорения грунта и энергетического коэффициента

наблюдений за какими-либо повреждениями или разрушениями гидротехнических сооружений при взрывах не имеется. Кроме того, при определении по указанным выше методам сейсмически безопасных зон взрыва предполагается, что рассматриваемое здание или сооружение практически повторяет движение грунта основания. Однако в случае гидротехнических сооружений это предположение обычно не оправдывается. Так, например, при слабых грунтах и монолитном гидросооружении движение последнего не совпадает с движением грунта основания при взрывах. Более того, за счет своей жесткости и инерционности гидросооружение вносит значительные искажения в общую картину движения окружающего его грунта [12]. В случае гидросооружений из местных материалов, имеющих очень большие размеры в плане и по высоте, последние также не будут полностью воспроизводить движение грунта основания. Кроме того, различные гидросооружения, в частности бетонные

плотины (гравитационные, контрфорсные, арочные); плотины из местных материалов (земляные и каменно-набросные); портовые гидросооружения (молы, волноломы, стенки набережных и др.), по их конструкции, размерам и условиям возведения значительно отличаются не только от обычных промышленно-гражданских зданий и сооружений, но и друг от друга. Поэтому вопрос о сейсмической опасности взрывов для гидротехнических сооружений, согласно действующим указаниям [4], должен решаться индивидуально в каждом конкретном случае.

С другой стороны, в связи с наблюдающимися значительными различиями в характере колебаний грунтов при промышленных взрывах и землетрясениях [9, 11, 13] возникает вопрос о том, в какой степени методы, применяемые при решении задач сейсмостойкости гидросооружений [8, 10, 14], могут быть использованы для оценки их динамической прочности и устойчивости при взрывных воздействиях. Многочисленные наблюдения показывают [5, 6, 7—11], что величина периодов и общая длительность процесса колебаний грунтов при промышленных взрывах примерно на порядок меньше, чем при землетрясениях. Так, периоды колебаний грунтов при землетрясениях в зависимости от различных факторов (интенсивности землетрясения, особенностей очага, характера и условий напластования грунтов, эпицентрального расстояния и т. п.) могут изменяться в пределах от 0,1 до 1,5—2,0 сек. При этом общая длительность процесса колебаний изменяется в пределах от 10 до 40 сек [7, 9]. В то же время периоды колебаний грунтов при промышленных взрывах измеряются сотыми или десятными долями секунды, причем наиболее высокая частота колебаний (в пределах от 25 до 50 гц) наблюдается в скальных породах и наиболее низкая (до 3—5 гц) в слабых наносах при большой мощности их залегания [3]. Общая длительность процесса колебаний при взрывах находится в пределах нескольких секунд или одного-двух десятков секунд. Лишь при очень мощных промышленных взрывах (достигающих по весу нескольких тысяч или десятков тысяч тонн) периоды и общая длительность процесса колебаний грунтов по их величине приближаются к периодам и общей длительности процесса колебаний грунтов, характерным для землетрясений [11]. Величина периодов колебаний грунтов при взрывах зависит от свойств грунтов, расстояния до места взрывов и представляется в следующей форме [11]:

$$T = K \log r, \quad (3)$$

где K — коэффициент, зависящий от свойств грунтов и равный 0,11—0,13 сек для водонасыщенных грунтов (пльвунов и торфа); 0,06—0,09 сек — для грунтов средней прочности 0,01—0,03 сек — для скальных пород;

r — расстояние до места взрыва в метрах.

Характер воздействия сейсмических волн взрывов и землетрясений на различные сооружения в значительной степени зависит от соотношения между длиной волны и соответствующими размерами сооруже-

Таблица 1

Значения полудлин волны при землетрясениях и взрывах для разных грунтов

Породы	Полудлина волны при землетрясениях с периодами		Периоды колебаний T и полудлина волны взрыва $\frac{\lambda}{2}$ на расстояниях					
	$T=0,5$ сек	$T=1,2$ сек	$r=100$ м		$r=1000$ м		$r=10\,000$ м	
			T , сек	$\frac{\lambda}{2}$, м	T , сек	$\frac{\lambda}{2}$, м	T , сек	$\frac{\lambda}{2}$, м
Скальные породы (граниты, известняки, песчаники)	900— 1250	2000— 3000	0,02— 0,06	70— 100	0,03— 0,09	100— 150	0,04— 0,12	150— 200
Меловые отложения (мергель, плотные глины), плотные сухие пески	250— 900	600— 2000	—	—	—	—	—	—
Грунты средней прочности (пески средней прочности, пластичные глины и суглинки)	100— 250	300— 600	0,12— 0,18	40— 75	0,18 0,27	60— 120	0,24— 0,36	75— 150
Грунты слабые (пески, супеси средней плотности, глины и суглинки заиленные, болотистые грунты)	50— 100	100— 300	0,22— 0,26	25— 60	0,33— 0,39	30— 75	0,44— 0,52	40— 100

ния. В табл. 1, по данным Ш. Г. Напетваридзе [10], для четырех разновидностей грунтов приведены значения полудлины сейсмических волн, вызванных землетрясениями с периодами колебаний $T=1,2$ сек и $T=0,5$ сек. Там же для сопоставления приведены ориентировочные значения параметров сейсмических волн взрыва (периодов колебаний и полудлины волн) на разных расстояниях от источника возбуждения, найденные по формуле (3).

Из табл. 1 видно, что длина сейсмической волны при взрывах, как правило, во много раз меньше, чем при землетрясениях. Только в случае слабых грунтов, на очень больших расстояниях (свыше 10 км) от места взрыва, она приближается по величине к длине сейсмической волны при землетрясениях с периодами $T \leq 0,5$ сек. Так как сейсмические волны в слабых грунтах весьма быстро затухают с расстоянием, они могут наблюдаться на больших удалениях от пункта возмущения лишь при очень мощных взрывах.

В зависимости от соотношения между полудлиной сейсмической волны $\frac{\lambda}{2}$ и размером гидросооружения по основанию могут различаться следующие основные расчетные случаи (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные случаи		Характер возмущения
Случай длинной волны	$\frac{\lambda}{2} \gg B_{\text{соор}}$	Длиннопериодные землетрясения
Случай короткой волны	$\frac{\lambda}{2} \ll B_{\text{соор}}$	Промышленные взрывы
Промежуточный случай	$\frac{\lambda}{2} \approx B_{\text{соор}}$	Короткопериодные землетрясения и крупные промышленные взрывы

При воздействии на гидросооружение длинной волны $\left(\frac{\lambda}{2} \gg B_{\text{соор}}\right)$ оно совершает движение, как некоторое тело или система на подвижном жестком или податливом основании, все точки которого испытывают одновременные синфазные колебания по определенному заданному закону. В этом случае расчет прочности и устойчивости гидросооружений из местных материалов с помощью так называемого статического метода производится в предположении, что рассматриваемое сооружение является абсолютно жестким и практически повторяет движения основания.

Величина расчетных сейсмических ускорений при проверке динамической устойчивости откосов принимается постоянной по высоте сооружения и численно равной максимальным ускорениям колебаний основания.

При использовании динамических методов расчета рассматриваются колебания гидротехнического сооружения как некоторой динами-

ческой системы при заданном законе движения основания. Определяются основные формы и частота колебаний сооружения, производится проверка возможности возникновения его резонансных колебаний, находят-ся эпюры распределения сейсмических инерционных сил и производится расчет динамической устойчивости откосов и всего профиля гидротехни-ческого сооружения в целом (10, 14 и др.).

При воздействии коротких сейсмических волн $\left(\frac{\lambda}{2} \ll B_{\text{соор}}\right)$ гидро-сооружение испытывает главным образом только местные кратковремен-ные изменения напряженно-деформированного состояния, обусловлен-ные прохождением через него сейсмических волн. В этом случае гидро-сооружение из местных материалов, при оценке его динамической проч-ности и устойчивости, иногда рассматривается как слой грунта перемен-ной (по ширине сооружения) мощности, расположенный на колеблю-щемся упругом полупространстве [7]. Определение соответствующих пе-риодов собственных колебаний T рассматриваемого слоя толщиной h производится по приближенной формуле:

$$T = \frac{4h}{v}, \quad (4)$$

где v — скорость распространения упругих продольных или попереч-ных волн в слое.

Проводится также проверка возможности возникновения резо-нансных колебаний слоя вследствие интерференции волн при их мног-кратном отражении от граничных поверхностей. Как показывают соот-ветствующие расчеты и наблюдения [8], в этом случае амплитуды сме-щений поверхностного слоя могут возрастать в 3—4 раза по сравнению с амплитудами смещений подстилающего скального массива и предст-авлять значительную опасность для прочности и устойчивости рассматри-ваемых гидротехнических сооружений. Возникновение резонансных ин-терференционных колебаний возможно лишь в том случае, если толщина слоя и длина сейсмической волны λ находятся в соотношении

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{4}; \quad \frac{3}{4}; \quad \frac{5}{4}; \quad \dots \dots \frac{(2k-1)}{4}, \quad (5)$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$

Кроме того, производится приближенное определение динамиче-ских напряжений $\sigma_{\text{сейсм}}$ в характерных точках, расположенных внутри тела плотины и ее основания, с помощью формулы, выражающей соотношение между основными параметрами (напряжением $\sigma_{\text{сейсм}}$, плотностью грунта ρ , скоростью распространения упругих волн C_p и скоростью колебаний частиц V_{max}) на фронте волны сжатия:

$$\sigma_{\text{сейсм}} = \rho C_p V_{\text{max}}. \quad (6)$$

Непосредственно на поверхности плотины и вблизи от нее напряже-ния равны нулю, и приведенная формула теряет смысл.

Найденные значения $\lambda_{\text{сейсм}}$ сопоставляются с величиной статических напряжений в тех же точках от собственного веса грунта. При этом дополнительные сейсмические напряжения в основании и в теле плотины не должны превышать по их величине соответствующие статические напряжения.

Еще более сложным является расчет промежуточного случая, когда полудлина сейсмической волны оказывается сопоставимой с шириной сооружения по его основанию ($\frac{\lambda}{2} \approx B_{\text{соор}}$). Подобные случаи могут наблюдаться при воздействии на гидросооружения, имеющие достаточно большие размеры в плане, сейсмических волн, вызванных короткопериодными землетрясениями с периодами $T=0,1-0,5$ сек или очень крупными промышленными взрывами.

В качестве примера может быть приведен случай воздействия на песчаную плотину высотой 30 м и шириной по основанию около 330 м сейсмических волн, вызванных короткозамедленными взрывами в карьере, на расстоянии от оси сооружения примерно 1,35 км, зарядов ВВ общим весом до 10 т, с весом зарядов в группе замедления до 2,0 т [7].

Произведенные измерения смещений поверхности грунта рядом с плотиной и характерных точек профиля сооружения при взрывах в карьере показали, что осредненные значения преобладающих периодов низшего тона колебаний изменялись в пределах $T=0,30-0,50$ сек, при среднем значении $T_{\text{ср}}=0,40$ сек. При этом полудлина сейсмической волны $\frac{\lambda}{2} = C_p \frac{T_{\text{ср}}}{2} \approx 1600 \frac{0,4}{2} = 320$ м, где $C_p \approx 1600$ м/сек — скорость распространения упругих продольных волн в основании оказалась сопоставимой с шириной подошвы сооружения.

Анализируя характер колебаний точек поверхности грунта в основании плотины, вызванных распространением в нем сейсмических волн взрыва, можно отметить, что в определенные фиксированные моменты времени все точки основания получают синфазные смещения только положительного либо только отрицательного знаков (аналогично случаю воздействия на сооружение длинной сейсмической волны). В другие моменты времени различные точки основания плотины получают смещения различных знаков, т. е. колеблются в противофазе (аналогично случаю воздействия на сооружение короткой волны). Соответственно этому расчет динамической прочности и устойчивости гидросооружения в рассматриваемом случае должен производиться на воздействие бегущей сейсмической волны. Но поскольку методика таких расчетов в настоящее время недостаточно разработана, приближенная проверка динамической прочности и устойчивости сооружения производилась с помощью всех приведенных выше методов, используемых при воздействии на сооружение как длинной ($\frac{\lambda}{2} \gg B_{\text{соор}}$), так и короткой ($\frac{\lambda}{2} \ll B_{\text{соор}}$) сейсмической волны с последующим сопоставлением и анализом полученных результатов.

Произведенные проверочные расчеты показали [7], что короткозамедленные взрывы зарядов весом до 20 т, с весом зарядов в группе до 2,0 т (при которых максимальная скорость колебаний точек песчаного основания и точек профиля плотины не превышает 0,3 см/сек) являются безопасными для прочности и общей устойчивости рассматриваемого сооружения.

Что касается вопросов, связанных с оценкой устойчивости структуры, а также возможности возникновения явлений разжижения водонасыщенных песчаных грунтов основания и тела плотины при динамических воздействиях от взрывов в карьере, то их изучение в настоящее время проводится с помощью специальных экспериментальных исследований. Из изложенного следует, что выбор методов оценки динамической прочности и устойчивости гидросооружений при взрывных воздействиях должен производиться в зависимости от соотношения между длиной сейсмической волны взрыва и характерным размером рассматриваемого сооружения.

В заключение отметим, что приведенные выше методы оценки сейсмической опасности взрывов для гидросооружений применимы лишь в тех случаях, когда сооружение находится на достаточно большом удалении от места взрывов, т. е. в «дальней зоне» взрыва. В этом случае наиболее интенсивное движение грунта основания в главной фазе колебаний обуславливается распространением по нему поверхностных сейсмических волн (типа волн Релея) и достаточно хорошо описывается приведенными выше закономерностями, полученными в работах М. А. Садовского [11, 13] и других исследователей [1, 6, 9]. Если же сооружение располагается на относительно небольших расстояниях от места взрыва, то общая картина движения грунта основания резко изменяется. В частности, волны взрыва в этом случае характеризуются очень высокими напряжениями, движение грунта имеет непериодический характер, наблюдаются очень большие необратимые (пластические) деформации грунтов и т. п. [9 и др.]. При этом расчет прочности и устойчивости сооружений должен производиться по особой методике. Практически при проведении крупных промышленных взрывов не допускается, чтобы гидросооружения могли находиться в ближней зоне взрыва.

В случае проведения вблизи от существующих гидросооружений взрывных подводно-технических работ могут возникнуть также вопросы, связанные с необходимостью определения параметров ударных волн взрыва в воде и их воздействия на рассматриваемые сооружения, которые должны решаться в соответствии с имеющимися данными в литературе (см., например, Р. Коул «Подводные взрывы», ИИЛ, М., 1950 г. и др.).

ВНИИГ им. Веденеева

1. Быховский В. А. Сейсмическое действие взрывов на сооружения. Сб. НИИ осн. и фундаментов, № 12. «Вибрации оснований и фундаментов», М., Стройвоенмориздат, 1948.
2. Дерибас А. А., Жилин Н. В., Красников Н. Д., Марченко Л. Л., Севастьянов Н. В. Колебания бетонного сооружения на скальном основании под действием взрывных нагрузок. ПМТФ, № 2, 1960.
3. Дов Лит Л. Сейсмическое действие взрыва. М., Госгортехиздат, 1963.
4. Единые правила безопасности при взрывных работах. М., Металлургиздат, 1962.
5. Иванов П. Л., Трушков Г. Т., Островский В. И., Сазонов В. В., Ращепцов. Уплотнение каменной постели и основания пола нефталавами и подводными взрывами. «Транспортное строительство», № 6, 1965.
6. Кириллов Ф. А. Сейсмический эффект взрыва. Тр. СИ АН СССР, № 121, 1947.
7. Красников Н. Д. Некоторые результаты исследований динамической устойчивости плотин при взрывных действиях. Тр. координационных совещаний по гидротехнике, вып. 28. Тематическое координационное совещание по динамике гидросооружений. Л., 1966.
8. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., Стройиздат, 1962.
9. Медведев С. В. Сейсмика горных взрывов. М., Изд. «Недра», 1964.
10. Напетваридзе Ш. Г. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. М., Госстройиздат, 1959.
11. Садовский М. А. Оценка сейсмически опасных зон при взрывах. Труды СИ АН СССР, № 106, 1941.
12. Садовский М. А. Случай действия сейсмики взрывов в условиях слабых грунтов и монолитного сооружения. Тр. СИ АН СССР, М., № 17, 1945.
13. Садовский М. А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности взрывов. М., изд. АН СССР, 1946.
14. СНиП, ПА, 12—62. Строительство в сейсмических районах. М., Госстрой, 1962.
15. Цейтлин, Я. И., Крючков В. В., Тихановский В. И. Исследование сейсмического эффекта взрывов на руднике Тырны-Аузского комбината, «Горный журнал», № 9, М., 1957.
16. Fred E. Cornwell. The effects of blasting on nearby structures. Handbook i Bergspunnginsteknik. Del. II, Stockholm, 1954.