

УДК 624.1+622.258

К ДИНАМИКЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ**Камалян С. Р., Камалян Р. З.**

TO THE DYNAMICS OF SATURATED SOILS

Kamalyan S. R. *, Kamalyan R. Z. **

* Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia

** Academy of marketing and socially-information technologies, Krasnodar, 350010, Russia
e-mail: kasarub@gmail.com

Abstract. There are considered the deformation processes in the soil body, resulting under the pulse action. Saturated soils play an important role in the study of such processes. This feature is related to short-term action. As a result of short-term action of excessive pressure, redistribution of water and air in the soil does not have time to occur and deformation is realized due to the air compression (reduction of water-ratio) and partially elastic compression of water and mineral matrix.

In the low moisture soils mineral matrix receives most of the dynamic load, with considerable friction between the particles that prevents their mutual displacement and repacking, and hence the development of volumetric deformation. Increasing humidity results in improved particles repacking and increased density. However, at high rates of soil moisture, water receives dynamic load, which deformation is elastic and soil compaction reduces. Therefore, there is optimum moisture rate under dynamic loading, which achieves the highest packing. From the analysis of experimental curves it shows that this value is approximately equal to the optimum moisture content of 20 %.

The ability to achieve maximum compaction of soil at the optimum moisture content is at the core of the explosive method of soil compaction. The paper shows the results of soil compaction on the experimental plots. We describe the details of the research. It confirmed the effectiveness of the method.

Keywords: water-saturated ground, the shock wave, distortion, dynamic loading, thinning, compaction, humidity.

Динамика грунтов исследует деформационные процессы в массиве, возникающие при импульсном воздействии на него (удар, взрыв). Они завершаются проявлением различных механических эффектов (уплотнением при трамбовке, уплотнением и образованием полостей, провальных воронок и воронок выброса) [1–8]. Особое место при изучении подобных процессов занимают водонасыщенные грунты [9–11].

Грунты подразделяются на две группы: сыпучие (несвязные) и связные. Сыпучие грунты неустойчивы и принимают форму внешней оболочки. Связные грунты сохраняют свою форму в ненагруженном состоянии благодаря наличию взаимосвязей между минеральными зёрнами, природа которых весьма разнообразна [12]. Но так как прочность этих связей невелика, то грунты относительно-

но легко теряют свою первоначальную форму при их нагружении и особенно при динамическом. В этой связи испытание мягких грунтов на растяжение практически неосуществимо, да и не представляет интереса, так как в большинстве случаев в реальных условиях имеют место напряжения сжатия, а не растяжения. Поэтому грунты, как правило, подвергаются испытанию на сжатие [13].

С целью упрощения анализа волновых процессов при динамическом деформировании для исследования грунтов под действием импульсной нагрузки применяют различные устройства, обеспечивающие одноосное сжатие образца в условиях невозможности бокового расширения [14].

Такая методика исследований имеет значительные преимущества при изучении закономерностей взрывного уплотнения мяг-

Камалян Самвел Рубенович, доцент, канд. физ.-мат.наук, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: kasarub@gmail.com.

Камалян Рубен Завенович, профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры математики и вычислительной техники Академии маркетинга и социально-информационных технологий; e-mail: karuzav@mail.ru.

ких грунтов. Поскольку скорость распространения волнового возмущения в такой среде выше ее массовой скорости, то процесс деформирования грунтов при взрыве можно разделить на две стадии: объемное сжатие, происходящее на фронте максимального давления во взрывной волне, в условиях, близких к одноосному сжатию, при невозможности бокового расширения и пластическое течение (формоизменение) пород за фронтом, происходящее без существенных объемных деформаций. Влияние кривизны фронта взрывной волны при детонации зарядов с центральной и осевой симметрий заметно лишь в непосредственной близости от очага взрыва. Поэтому можно считать, что условия деформирования пород при одноосном сжатии без бокового расширения близки к условиям их деформирования при взрыве.

Грунты представляют собой смесь твердых частиц разного размера и формы, между которыми существуют связи (сцепление), разные по физическому происхождению и прочности [13]. Отличительной особенностью грунтов является малая прочность связей по сравнению с внутри- и межкристаллическими связями в твердых зернах. Промежутки между твердыми частицами (поровое пространство) заполнены жидкостью и газом. В зависимости от содержания последних в порках, грунты делятся на водонасыщенные и неводонасыщенные. В водонасыщенном грунте содержание воздуха относительно мало и находится он в заземленном состоянии. В неводонасыщенном грунте содержание воздуха относительно велико и он свободно сообщается с атмосферой. Механические свойства водонасыщенных и неводонасыщенных грунтов различны. Если поры грунта заполнены водой, а заземленный воздух отсутствует, то такой грунт является полностью водонасыщенным.

Прохождение взрывных волн так же, как и действие статических нагрузок, вызывает сжатие грунта, повышение его плотности. Основное отличие напряжения, возникающего в грунте при динамическом (ударном или взрывном) сжатии, от напряжения, создаваемого статическими нагрузками, заключается в кратковременности действия.

При динамическом нагружении вследствие кратковременности действия избыточного давления перераспределение воды и воздуха в грунте не успевает произойти и деформирование осуществляется в основном за счет сжатия воздуха (уменьшения свободной по-

ристости) и частично упругого сжатия воды и минерального скелета.

В грунтах малой влажности динамическую нагрузку воспринимает в основном минеральный скелет, причем значительное трение между минеральными частицами препятствует их взаимному перемещению и переукладке, следовательно, и развитию объемных деформаций. Повышение содержания влаги в породе приводит к тому, что минеральные зерна оказываются окруженными водной эластичной пленкой (в основном адсорбционного происхождения), которая играет роль смазки при взаимной переукладке частиц в процессе уплотнения. При большой влажности породы динамическая нагрузка воспринимается водой, деформирование которой происходит упруго, и уплотнение грунта уменьшается. Следовательно, при динамическом нагружении можно ожидать наличия некоторой оптимальной влажности, при которой необратимые деформации грунтов оказываются наибольшими [15].

Обратимся к экспериментальным результатам (рис. 1) [11]. Анализ кривых показывает значительную зависимость деформаций суглинков от влажности. При возрастании влажности до $\omega = 20\%$ наблюдается выполаживание нагрузочных ветвей диаграмм сжатия, что свидетельствует об увеличении деформаций при фиксированных уровнях контактного давления. При $\omega > 20\%$ наклон ветвей нагружения возрастает вследствие уменьшения объемной сжимаемости грунта. Угол наклона ветвей разгрузки с возрастанием влажности несколько увеличивается. Это определяет соотношение между максимальными значениями деформаций (полных, упругих и необратимых) при различных значениях влажности (рис. 2) [11].

Из рис. 2 видно, что законы распределения полных и необратимых деформаций суглинков аналогичны. Кривые имеют один максимум, соответствующий условиям развития наибольших деформаций в грунте.

Упругость грунтов с ростом их влажности увеличивается. Можно ожидать, что при некотором конечном значении влажности упругая деформация будет равна общей деформации грунта. В этом случае необратимые деформации в грунте будут отсутствовать и грунт перейдет в состояние грунтовой массы (рис. 3), т.е. в разжиженное состояние [16–19]. Поведение разжиженного грунта под действием внешней нагрузки практиче-

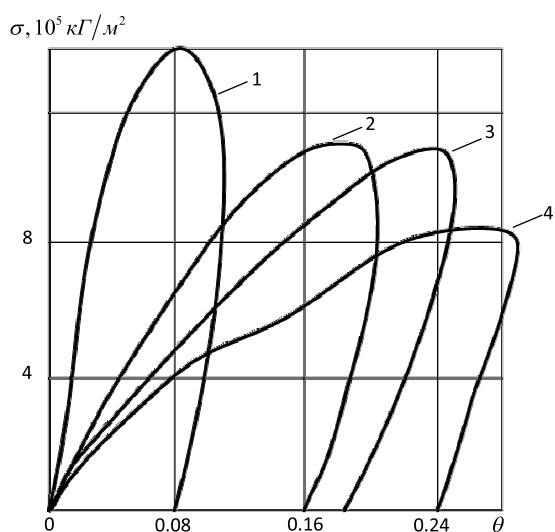


Рис. 1. Семейство кривых динамического сжатия суглинков при различных значениях их влажности ω : 1 – 9 %; 2 – 14,2 %; 3 – 20 %; 4 – 17,1 %

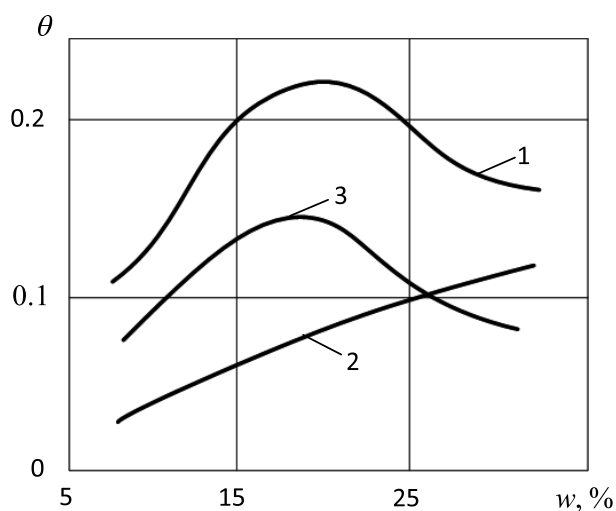


Рис. 2. Максимальные значения полных (1), упругих (2) и необратимых (3) деформаций при различных значениях влажности

ски определяется законами, свойственными жидкости [11].

Возможность достижения максимального уплотнения грунтов при оптимальном значении влажности легла в основу взрывных технологий по укреплению и уплотнению просадочных грунтов в строительстве. В зависимости от расположения заряда относительно объекта воздействия возможно уплотнение глубинными, поверхностными и подводными взрывами.

При глубинном способе заряды погружаются на глубину, обеспечивающую отсутствие выброса и существенного выпора грунта. Поверхностный способ предусматривает применение накладных зарядов, подрываемых на поверхности грунта.

В случае подводных взрывов заряды взрывчатого вещества (ВВ) опускаются в воду и подрываются над поверхностью грунта. Детонация ВВ под водой сопровождается распространением по ней сильной ударной волны, которая, достигнув дна, и частично отразившись, распространяется вглубь массива по скелету грунта и по поровой воде, разрушая ее рыхлую малоустойчивую структуру. Разрушению структуры способствует пульсация образующегося при детонации газового пузыря, который перемещается к поверхности воды. Важное значение имеет высота подвеса заряда. При его близком расположении к поверхности грунта под действием ударной волны и вследствие большой начальной скоро-

сти движения расходящегося потока воды под зарядом возможно образование воронки из-за выброса грунта. Отсутствие существенной воронки выброса при взрыве является одним из основных условий, определяющих массу заряда и расстояние от него до уплотняемой поверхности (высоту подвески заряда).

Слой воды ниже заряда выполняет также роль подушки для равномерной передачи действия ударной волны на уплотняемый грунт. На интенсивность взрывной волны и напряженное состояние окружающей среды существенное влияние оказывают свойства граничных поверхностей. Так, например, при взрыве в воде подход взрывной волны к границе с воздухом, обладающим сравнительно малым сопротивлением сжатию, приводит к возрастанию скорости движения воды. В случае близкого расположения заряда к дневной поверхности возможно преодоление сил тяжести и сил взаимодействия между частицами среды, что приводит к образованию выброса воды. Если прорыв газов (продуктов детонации) в атмосферу происходит до максимального развития газового пузыря, взрывная волна в воде не успевает полностью сформироваться. Поэтому уменьшение глубины заложения заряда и образование интенсивного выброса приводит к уменьшению параметров взрывной волны.

В случае камуфлетного взрыва в водонасыщенном грунте или воде около 75 % энергии продуктов детонации переходит в полез-



Рис. 3. Грунт, пришедший в разжиженное состояние в результате подземного взрыва

ную механическую энергию ударной волны и газового пузыря [20].

Исследование движения газовой полости позволило получить закон расширения полости, его максимальный радиус, время достижения этого радиуса, всплытие и т.п.

Очевидно, что значение параметров на ударном фронте являются определяющими для процессов деформации и уплотнения грунтов. Эти параметры определяются через избыточное давление за фронтом волны.

Анализ экспериментальных данных показывает, что избыточное давление на ударном фронте при взрыве заряда в воде описывается функцией

$$\Delta P_{уд} = A(r_0/r)^\alpha,$$

где r_0 — радиус заряда.

Для сферической ударной волны [20]

$$A = 37\,000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \quad \alpha = 1,5 \text{ при } 6 < r/r_0 < 12,$$

$$A = 14\,700 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \quad \alpha = 1,13 \text{ при } 12 < r/r_0 < 240,$$

При не слишком большой глубине погружения заряда, что соответствует подводному методу уплотнения грунтов, давление в окрестности фронта ударной волны хорошо

описывается выражением

$$p(t) = \Delta p_{уд} \begin{cases} e^{-t/\theta} & \text{при } t < \theta, \\ 0,3680 & \text{при } \theta < t < 5 \div 10, \end{cases} \quad (1)$$

где θ — постоянная экспоненциального затухания, зависящая от расстояния, которая может быть определена по формуле [20]

$$\theta = B_1(r/r_0)^\beta r_0/c_0.$$

Для сферического заряда из тротила

$$B_1 = 1,4, \quad \beta = 0,24 \text{ при } 20 < r/r_0 < 240.$$

С учетом (1) для величины импульса давления в ударной волне

$$i_{уд} = \int_0^\tau p \, dt = \Delta p_{уд} \theta \begin{cases} 1 - e^{-t/\theta} & \text{при } t < \theta, \\ 0,632 + 0,368 \ln \frac{t}{\tau} & \text{при } \theta < t < 5 \div 10, \end{cases}$$

Для практических расчетов удобнее использовать соотношения, связывающие основные параметры ударных волн с массой заряда q и расстоянием действия R . Используя методы теории размерности избыточное давление, удельный импульс и плотность потока

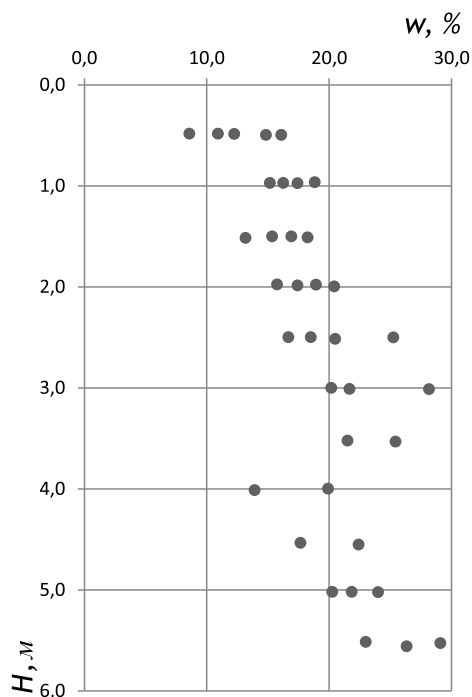


Рис. 4. Распределение влажности по глубине H на всех отсеках

энергии в ударной волне от сосредоточенного заряда (заряда сферической симметрии) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{уд}} &= k_1(q^{1/3}/R)^\alpha, \\ t_{\text{уд}} &= k_2q^{1/3}(q^{1/3}/R)^\beta, \\ E_{\text{уд}} &= k_2q^{1/3}(q^{1/3}/R)^\gamma, \end{aligned} \quad (2)$$

где q выражено в кг, R — в м.

Для некоторых типов ВВ неизвестные коэффициенты и пределы их применимости в формулах (2) представлены в [20].

Ниже приведены некоторые результаты работы по уплотнению грунтов подводными взрывами. К моменту проведения этих работ уже был накоплен определенный опыт применения взрывного метода уплотнения грунтов [21].

Параллельно проводились испытания по определению физико-механических характеристик лессовых грунтов до и после взрыва. Экспериментальные работы позволили установить степень проработки слоя и контур уплотнения лессовых грунтов в глубину и в стороны.

Полевые эксперименты проводились на опытной площадке, где были открыты 6 отсеков (1 контрольный). Для определения физико-механических характеристик грунта в центре

каждого отсека были открыты шурфы с сечением в плане $1,2 \times 0,85$ м. Глубина шурфов ограничивалась уровнем грунтовых вод. Из каждого шурфа через 0,5 м по высоте были отобраны монолиты размером $20 \times 20 \times 20$ см, а также пробы на влажность. Характер изменения влажности по всем отсекам представлен на рис. 4. Значения свойств грунта в двух отсеках приведены в табл. 1.

Перед подвеской зарядов в каждом из пяти отсеков было выполнено контрольное нивелирование, которое не выявило никаких просадок в результате предварительной замочки. Во всех отсеках заряды располагались в шахматном порядке через 1 м друг от друга. Различными были высоты подвесок и массы зарядов. Оценку последних осуществляли по формулам (2).

Параметры первого отсека:

- ширина по дну — 2 м;
- заложение откосов — $m = 1,0$;
- масса заряда — 1,4 кг;
- высота подвески над уплотняемой поверхностью — 0,5 м;
- количество зарядов — 200 шт;
- время наполнения отсека водой — 9,5 ч;
- глубина наполнения — 2 м;
- верхний контур зарядов прикрыт водой на 45–50 см.

Таблица 1

Номера отсеков	Номера шурфов	Глубина отбора, м	Влажность, w , %	Плотность, ρ , г/см ³	Пористость, n , %	Пластичность
I	1	0,5	16,05	1,44	46,7	4
		1,0	18,2	1,42	47,8	4
		1,5	18,4	1,49	45,2	3
		2,0	27,0	1,51	43,9	4
		2,5	26,6	1,53	42,7	4
		3,0	22,6	1,49	44,8	3
II	2	0,5	8,6	1,47	45,1	4
		1,0	9,8	1,49	43,8	3
		1,5	13,7	1,52	43,7	3
		2,0	16,1	1,55	41,9	3
		2,5	18,6	1,56	41,8	2
		3,0	21,6	1,43	46,8	2



Рис. 5. Вид отсека после взрыва: 1 — вода; 2 — трещины

В результате подрыва зарядов силой взрыва часть воды была выброшена из отсека. Вокруг каждого отсека по периметру образовались трещины, размер которых уменьшается к периферии (рис. 5). В течение 20–30 мин. после взрыва наблюдалась интенсивная фильтрация воды. За первые 30 мин. горизонт воды в отсеках падал на 15–30 см, тогда как за последующие 14 ч. уровень воды понизился на 8–12 см. Интенсивную фильтрацию воды в первые минуты можно объяснить тем, что в результате взрыва вокруг котлована образовались трещины, сильно раскрытые в верхней части и, как подтвердили дальнейшие исследования, сильно развиты вглубь. Они и поглощали воду.

Причиной образования трещин, по-видимому, явилось завышение массы сосредоточенных зарядов. Очевидно, это связано с неточным определением коэффициентов в эмпирических формулах (2).

С увеличением массы заряда размер трещин вблизи котлована заметно увеличился, тогда как зона трещиноватости увеличилась незначительно.

Величина коэффициента фильтрации в течение первых 4-х суток после взрыва составила 0,056–0,062 м/сут, т.е. уменьшилась по сравнению с K_f в естественном состоянии в 7–8 раз. Последующие наблюдения показали, что величина фильтрации через год не уменьшилась и находится в пределах 0,05–0,06 м/сут.

Для изучения распространения трещин вглубь на бровке отсеков были отрыты шурфы глубиной 4,5 м. Начиная с глубины 0,8–1,0 м, трещины закольматированы. Визуально трещины прослеживались до 4,5 м вглубь. По техническим причинам проходка шурфов глубже 4,5 м, т.е. ниже уровня грунтовых вод, оказалась невозможной.

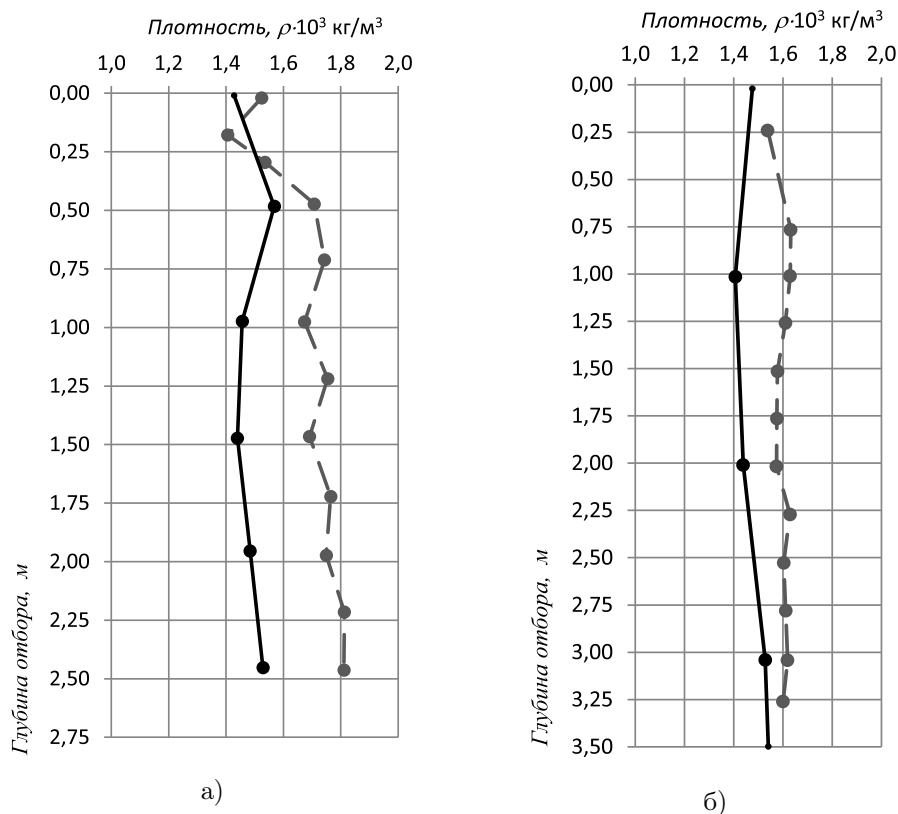


Рис. 6. Распределение плотности грунта по глубине: а) отсек I; б) отсек IV; 1 — плотность грунта до уплотнения, 2 — после уплотнения

Для изучения физико-механических свойств грунтов после взрыва в каждом отсеке было пройдено по три шурфа до уровня грунтовых вод. Один шурф был отрыт в центре отсека и два по бортам. Исследования показали, что плотность грунта увеличилась после взрыва на 6–12 %. Увеличение плотности наблюдается до уровня грунтовых вод. Распределение плотности грунта по глубине в двух отсеках представлено на рис. 6.

На рис. 6 приведены результаты исследований образцов отобранных из центральных шурфов. Заслуживает внимания кривая плотности в отсеке IV, где взрывание проводилось в тот момент, когда грунт ниже отметки дна отсека находился в полностью водонасыщенном состоянии. Как видно из рис. 6б, плотность грунта ниже отметки дна увеличилась незначительно, тогда как по бортам, где степень увлажнения была ниже, увеличение плотности достигает 7 %. Это подтверждает предположение о том, что в полностью водонасыщенных грунтах добиться существенного изменения плотности невозможно ввиду

возрастания упругости грунтов с ростом их влажности [22].

Выводы

По результатам проведенных исследований можно отметить:

- 1) Плотность грунтов опытного участка в результате подводного взрыва возросла на 6–12 %.
- 2) Оптимальная влажность $W_{\text{опт}}$, при которой плотность грунта достигает максимального значения примерно равна $W = 18\text{--}20\%$.
- 3) Величина фильтрации после взрыва уменьшилась в 7–8 раз и сохранилась на этом уровне и через год.
- 4) Увеличение плотности прослеживается до уровня грунтовых вод по всей толще массива (до глубины более 4-х метров).
- 5) Уменьшение фильтрации связано как с уплотнением грунтов, так и последующей кольматацией трещин частицами грунта.

Литература

1. Григорян С.С. Об ударном уплотнении лессовых грунтов // Известия АН СССР. Отделение технических наук. Механика и машиностроение. 1964. № 6. С. 127–130.
2. Камалян Р.З. Об уплотнении просадочных грунтов энергией взрыва // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1994, № 1–2. С. 137–142.
3. Литвинов И.М. Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве. Киев: Будівельник, 1977. 288 с.
4. Иванов П.Л. Уплотнение малосвязанных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983. 230 с.
5. Механический эффект подземного взрыва / Под ред. акад. М.А. Садовского. М.: Недра, 1971. 224 с.
6. Адушкин В.В., Перник Л.М. Провальные воронки при подземных взрывах в слабосвязанных грунтах // Физика горения и взрыва. 1978. № 3. С. 97–104.
7. Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Николаевский В.Н., Цветков В.М. Механика подземного взрыва // Итоги науки и техники. Сер.: Механика твердого деформируемого тела. 1977. Т. 7. С. 87–197.
8. Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И.А. Лучко. Киев: Наукова думка, 1989. 232 с.
9. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.
10. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982. 286 с.
11. Вовк А.А., Смирнов А.Г., Кравец В.Г. Динамика водонасыщенных грунтов. Киев: Наукова думка, 1975. 302 с.
12. Кульчицкий К.В., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981. 178 с.
13. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 455 с.
14. Месчан С.Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М.: Недра, 1974. 192 с.
15. Михалюк А.В. Объемное деформирование грунтов при динамическом нагружении и его энергоемкость / В сб. Взрывное дело, 81/38. М.: Недра. 1979. С. 98–106.
16. Van der Kog H. Wave phenomena // Computers and Geotechnics. 1987. Vol. 3. No. 1. P. 21–28.
17. Yegian M.K., Whitman R.V. Risk analysis for ground failure by liquefaction // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1978. July. P. 921–937.
18. Камалян Р.З., Камалян С.Р. О разжижении грунтов при динамических воздействиях // Обозрение прикл. и промышл. математики. 2001. Т. 8. Вып. 2. С. 602–603.
19. Камалян С.Р. О проблеме разжижения грунтов при подземных взрывах // Природа. Общество. Человек. Естественные науки. 2012. № 1(14). С. 120.
20. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
21. Арутюнов О.А., Китаер Б.И., Камалян Р.З. Эффективность уплотнения просадочных грунтов взрывом // Строительство и архитектура Узбекистана, 1979, № 5. С. 34–35.
22. Камалян Р.З., Камалян С.Р. К динамике грунтовых масс // Вестник ИМСИТа. 2015. № 2. С. 65–68.

References

1. Grigoryan S.S. Ob udarnom uplotnenii lessovykh gruntov [Shock compaction loess soils]. *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [News of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences. Mechanics and Mechanical Engineering], 1964, no. 6, pp. 127–130. (In Russian)
2. Kamalyan R.Z. Ob uplotnenii prosadochnykh gruntov energiyey vzryva [On the subsidence of soil compaction energy explosion]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki* [Proc. of the Universities. North-Caucasian region. Technical science], 1994, no. 1–2, pp. 137–142. (In Russian)
3. Litvinov I.M. *Ukrepjenie i uplotnenie prosadochnykh gruntov v zhilishchnom i promyshlennom stroitel'stve* [Strengthen and seal collapsible soils in the residential and industrial construction]. Kiev, Budivel'nik Pub., 1977, 288 p. (In Russian)
4. Ivanov P.L. *Uplotnenie malosvyazannykh gruntov vzryvami* [Seal loosely soils by explosions]. Moscow, Nedra Pub., 1983, 230 p. (In Russian)
5. Sadovskiy M.A. (ed.) *Mekhanicheskijy effekt podzemnogo vzryva* [The mechanical effect of an underground explosion]. Moscow, Nedra Pub., 1971, 224 p. (In Russian)
6. Adushkin V.V., Pernik L.M. Proval'nye voronki pri podzemnykh vzryvakh v slabosvyazannykh gruntakh [The failed funnel in underground explosions in weakly soils]. *Fizika gorenija i vzryva* [Physics of combustion and explosion], 1978, no. 3, pp. 97–104. (In Russian)
7. Adushkin V.V., Kostyuchenko V.N., Nikolaevskiy V.N., Tsvetkov V.M. *Mekhanika podzemnogo vzryva* [Mechanics underground explosion]. *Itoги nauki i tekhniki. Ser.: Mekhanika tverdogo deformiruemogo tela* [Results of science and technology. Series: Mechanics of solid deformable body], 1977, vol. 7, pp. 87–197. (In Russian)
8. Luchko I.A. (ed.) *Mekhanicheskijy effekt vzryva v gruntakh* [The mechanical effect of the explo-

- sion in the ground]. Kiev, Naukova dumka Pub., 1989, 232 p. (In Russian)
9. Lyakhov G.M. *Osnovy dinamiki vzryvnykh voln v gruntakh i gornyykh porodakh* [Fundamentals of dynamics of shock waves in the soils and rocks]. Moscow, Nedra Pub., 1974, 192 p. (In Russian)
 10. Lyakhov G.M. *Volny v gruntakh i poristykh mnogokomponentnykh sredakh* [Waves in soils and porous multicomponent media]. Moscow, Nauka Pub., 1982, 286 p. (In Russian)
 11. Vovk A.A., Smirnov A.G., Kravets V.G. *Dinamika vodonasyshchennykh gruntov* [Dynamics of saturated soils]. Kiev, Naukova dumka Pub., 1975, 302 p. (In Russian)
 12. Kul'chitskiy K.V., Us'yarov O.G. *Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya svoystv glinistykh porod* [Physical and chemical bases of formation properties of clay rocks]. Moscow, Nedra Pub., 1981, 178 p. (In Russian)
 13. Koste Zh., Sanglera G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Stroyizdat Pub., 1981, 455 p. (In Russian)
 14. Meschyan S.R. *Mekhanicheskie svoystva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniya* [Mechanical properties of soils and laboratory methods of their definition]. Moscow, Nedra Pub., 1974, 192 p. (In Russian)
 15. Mikhalyuk A.V. Ob"emnoe deformirovanie gruntov pri dinamicheskom nagruzhении i ego energoemkost' [Volumetric deformation of soil under dynamic loading and its energy intensity]. In *Vzryvnoe delo* [Explosion technology], 81/38, Moscow, Nedra Pub., 1979, pp. 98–106. (In Russian)
 16. Van der Kog H. Wave phenomena. *Computers and geotechnics*, 1987, vol. 3, no. 1, pp. 21–28.
 17. Yegian M.K., Whitman R.V. Risk analysis for ground failure by liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, July, pp. 921–937.
 18. Kamalyan R.Z., Kamalyan S.R. O razzhizhenii gruntov pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [About soil liquefaction by the dynamic impacts]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2001, vol. 8, iss. 2, pp. 602–603. (In Russian)
 19. Kamalyan S.R. O probleme razzhizheniya gruntov pri podzemnykh vzryvakh [On the problem of soil liquefaction in underground explosions]. *Priroda. Obshchestvo. Chelovek. Estestvennyye nauki* [Nature. Society. Human. Natural Sciences], 2012, no. 1(14), pp. 120. (In Russian)
 20. Stanyukovich K.P. (ed.) *Fizika vzryva* [Explosion physics]. Moscow, Nauka Pub., 1975, 704 p. (In Russian)
 21. Arutyunov O.A., Kitaer B.I., Kamalyan R.Z. Effektivnost' uplotneniya prosadochnykh gruntov vzryvom [The effectiveness of compaction of soil subsidence explosion]. *Stroitel'stvo i arkhitektura Uzbekistana* [Construction and architecture of Uzbekistan], 1979, no. 5, pp. 34–35. (In Russian)
 22. Kamalyan R.Z., Kamalyan S.R. K dinamike gruntovykh mass [Dynamics of groundwater masses]. *Vestnik IMSITa* [Bulletin of Academy of marketing and socially-information technologies], 2015, no. 2, pp. 65–68. (In Russian)