

SPIN-код: 2894-2461  
 AuthorID (РИНЦ): 175269  
 AuthorID (SCOPUS): 6603904601  
 ResearcherID: J-4245-2013

**МИННЕХАНОВ Гизар Нигъматьянович**, директор  
 ООО «Технологический центр», г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566737

**МИННЕХАНОВ Руслан Гизарович**, заместитель ди-  
 ректора ООО «Технологический центр», г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566738

Адрес для переписки: weld\_techn@mail.ru

Для цитирования

Еремин Е. Н., Миннеханов Г. Н., Миннеханов Р. Г. При-  
 менение инокулирующего модифицирования для повышения  
 стойкости литого металла заготовок из нержавеющей стали  
 к межкристаллитной коррозии // Омский научный вестник.  
 2018. № 4 (160). С. 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-5-  
 10.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018 г.

© Е. Н. Еремин, Г. Н. Миннеханов, Р. Г. Миннеханов

УДК. 621/9

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-10-17

**Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ**  
**Д. Д. ГАПОН**

Омский государственный  
 технический университет,  
 г. Омск

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ КОММУНИКАЦИЙ

Предложена инженерная методика выбора технических параметров пневмо-  
 пробойника для горизонтальной забивки стальных труб в основания доро  
 для проведения различных коммуникаций: электрические кабели, линии связи,  
 канализация и т.д. Методика основана на использовании уравнения связи за-  
 конов сохранения энергии и импульса, а также уравнения коэффициента вос-  
 становления. Рассмотрены примеры горизонтальной забивки труб в сжимае-  
 мом грунте. Введено понятие «дополнительная масса» для учета силы трения  
 грунта о трубу. Данная величина добавляется к массе трубы. Она позволяет  
 оценить КПД передачи кинетической энергии от бойка пневмоударника к тру-  
 бе по мере увеличения заглубления трубы в грунт.

**Ключевые слова:** теория удара, подземная прокладка коммуникаций, пневмо-  
 ударник, масса бойка, законы сохранения энергии и импульса.

**Введение.** К настоящему времени накопилось  
 значительное количество исследований по теории  
 удара. Кратко рассмотрим основные публикации  
 по теории удара.

В первую очередь, необходимо выделить не-  
 сколько основных трудов Jonson K. L. [1], Goldsmith  
 W. [2], Stronge W. J. [3], Александров Е. В. и др.  
 [4], Кильчевский Н. А. [5], Алабужев П. М. и др.  
 [6], которые рассматривают все основные теории  
 удара: центральный удар твердых деформируемых  
 тел; удар твердых деформируемых тел в плоскости  
 и в пространстве; численное моделирование удар-  
 ного процесса, удар тел переменной жесткости  
 и другие теории.

Другие авторы изучают отдельные конкрет-  
 ные направления теории удара. В работах [7–25]  
 изучаются теоретические вопросы, связанные  
 с распространением ударных волн в материале, по-  
 строением полей напряжений и деформаций в со-  
 ударяющихся телах. Стихановский Б. Н. [7] изучает  
 энергетические соотношения при ударе. Akkas N.

и др. [8] изучают распространение упругой волны  
 в стержне. Akakawa K. и др. [9] рассматривают  
 экспериментальную установку стреляющую мя-  
 чами для гольфа с целью поражения стальной ме-  
 таллической пластины. С помощью методов ско-  
 ростной фотографии определяются деформации  
 мяча и строятся графики зависимости силы удара  
 в зоне контакта от времени. Chernyavskii D. I. [10]  
 рассматривает вопрос расчета ударной силы при  
 упруго-пластическом контакте тел и построение  
 поля напряжений в данных телах, а в [11] опреде-  
 ляет границы перехода сферического фронта удар-  
 ной волны в плоский фронт для соударяющихся  
 стержней. Connesson N. и др. [12] рассматривают  
 экспериментальное распределение энергии в ходе  
 ударного процесса. Авторы отмечают, что главное  
 распределение энергии происходит в первом цикле  
 ударного процесса. Динамическое разрушение бе-  
 тона исследуют Goldsmith W. и др. [13], а проник-  
 новение бойка в стальную конструкцию изучают  
 Golubev V. K. и др. [14]. Исследование напряжений

Технические характеристики пневмомолотов «Тайфун» [30].

Название пневмомолота	Энергия удара, Дж	Частота ударов, Гц	Масса бойка, кг	Масса машины, кг	Длина/диаметр машины, мм	Наибольший диаметр забиваемых труб, мм
Тайфун-8	83	9,8	8	16	750/95	57
Тайфун-40	400	3–5	40	80	800/160	159
Тайфун-70	700	2,5–4,2	70	140	1400/160	273
Тайфун-100	1000	2–4	100	230	1150/240	325
Тайфун-130	1300	2,5–3,3	130	280	1350/240	325
Тайфун-150	1500	7–9	150	320	1150/270	325
Тайфун-190	1800	2,3–2,9	190	380	1680/240	530
Тайфун-320	2800	1–2	320	650	1920/270	630
Тайфун-500	4000	1–0,9	500	1300	1910/270	820
Тайфун-740	6000	0,8–1,2	740	1750	2520/410	1020
Тайфун-1000	9000	0,67–1	1000	2250	2670/456	1220

в материале, подвергающемся ударной нагрузке, проводятся в работах Насини Л. и др. [15] и Jamjian M. и др. [16]. Kenner V. H. и др. [17] определяют теоретические и экспериментальные отличия в формировании ударных сил и напряжений при ударе шаров о металлические конусы с различными геометрическими размерами. Salisbury C. P. и др. [18], Suh S. L. и др. [19], Wang K. и др. [20] и Wang Z. G. и др. [21] изучают распределение напряжений в материалах в ходе ударного взаимодействия. Wu E. и др. [22, 23] проводят экспериментальные исследования нормального удара стержня о металлическую пластину, а разрушение бетона в ходе динамических испытаний экспериментально изучают Zhang L. и др. [24]. Chernyavskii D. I. и др. [25] показали возможность применения в нанотехнологиях ударных волн.

**Постановка задачи.** В настоящее время широко применяется ударный способ прокладки коммуникаций через грунтовое основание автомобильных и железных дорог, что позволяет проводить строительные работы без отмены движения транспортных средств по этим дорогам. Пневматический пробойник проталкивает стальную трубу заданного диаметра через грунтовое основание дороги. После этого строители прокладывают внутри трубы электрические кабели, линии связи, газовые трубы и иные коммуникации. Главным направлением совершенствования таких ударных машин является повышение общих характеристик ударного процесса. Решению данной задачи посвящен ряд нормативных документов и научных публикаций [26–29].

В настоящее время промышленностью выпускается значительное количество различных наименований пневмопробойников. Например, Институтом горного дела Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН) разработано 11 типов машин различной ударной мощности с энергией удара от 83 до 9000 Дж и частотой ударов от 9 до 0,7 Гц (табл. 1). Однако необходимо уточнение методики проектирования таких машин с учетом дальнейшего развития теории удара.

**Теория.** Сначала определим выражения, определяющие КПД передачи кинетической энергии от бойка ударной машины к трубе. Для построения ударной модели примем допущение, что боек и труба подвешены на баллистической подвеске и после удара сохраняют горизонтальное положение, т.е. удар предполагается центральным, а также отсутствует вращательное движение бойка и трубы вокруг соответствующих центров масс. Данный случай описывается выражением

$$\eta = \frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2 + 2m_1 m_2 V_1 V_2 + (m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2)(m_1 + m_2) + m_1 m_2 k_{12}^2 (V_2^2 - 2V_1 V_2 + V_1^2)}{\dots} \rightarrow \quad (1)$$

где  $\eta$  — коэффициент передачи кинетической энергии;  $k_{12}$  — коэффициент восстановления;  $m_1$  — масса бойка ударной машины,  $m_2$  — масса трубы с наголовником, по которому бьет боек;  $V_1$  — доударная скорость центра масс бойка;  $V_2$  — доударная скорость массы трубы с наголовником, рисунок 1 [29].

Как известно, длительность ударных процессов составляет десятки, сотни и тысячи микросекунд, а частота ударов в ударных машинах не превышает 50 Гц. Чем мощнее машина, тем частота ударов меньше. Поэтому можно считать, что в промежутке между ударами труба остается неподвижной, т.е.  $V_2 = 0$ . Таким образом, выражения (1) преобразуются в выражение (2).

$$\eta = \frac{1 + m k_{12}^2}{(1 + m)} = \frac{1}{(1 + m)} + \frac{m k_{12}^2}{(1 + m)}, \quad (2)$$

где  $m = m_2/m_1$ .

Рассмотрим подробнее данный пример случая горизонтальной забивки трубы в грунтовое основание дороги. В начальный момент времени, когда конец трубы касается поверхности вертикального



Рис. 1. Прокол трубы основания дороги:  
1 — труба, 2 — пневмопробойник,  
3 — наголовник трубы [29]

грунтового основания, трубу и боек можно рассматривать как свободно горизонтально подвешенные тела, к которым можно применить полученные соотношения.

При первом ударе труба проникает в грунт и появляются сила трения грунта о внешнюю поверхность трубы и сила сопротивления грунта на торец трубы. При забивке металлических труб в уплотняемые грунты, как правило, забиваемый конец трубы открыт для уменьшения сопротивления грунта движению трубы. После окончания операции забивки с помощью специального оборудования грунт удаляется из забитой трубы сжатым воздухом. Так как торец трубы имеет намного меньшую площадь, чем ее боковая поверхность, примем допущение, что сила бокового трения намного больше, чем сила, действующая на торец трубы. Поэтому силу, действующую на торец трубы, не учитываем.

В ходе прокола трубы основания дороги над трубой образуется свод породы, который практически не воздействует своим весом на верхнюю внешнюю поверхность трубы. Однако вес грунта, заполняющего внутреннее пространство трубы, формирует дополнительную массу, которая оказывает значительное воздействие на процесс забивания трубы в грунт.

Для учета силы трения, действующей на внешнюю поверхность трубы снизу, введём понятие «дополнительная масса —  $m_{pr}$ ». Эта масса добавляется к массе трубы с наголовником, поэтому величина  $m$  увеличивается. Чем больше длина забитой трубы, тем больше сила трения, т.е. больше величина  $m_{pr}$ . Определим соответствие между дополнительной массой  $m_{pr}$  и силой трения  $F_{tr}$  внешней поверхности трубы о грунт. Как известно,

$$F_{tr} = Nf, \quad (3)$$

где  $N$  — нормальная сила,  $f$  — коэффициент трения. Так как труба пролегает горизонтально, то сила  $N$

слагается из веса трубы и веса грунта, находящегося внутри трубы.

$$F_{tr} = \left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) fg, \quad (4)$$

где  $m_g$  — масса трубы с наголовником;  $d$  — внутренний диаметр трубы;  $l$  — длина трубы, находящаяся в грунте в данный момент времени;  $\rho$  — плотность грунта;  $g$  — ускорение свободного падения. Согласно закону Ньютона —  $F=ma$ . Тогда

$$m_{pr} = \frac{\left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) fg}{a_{im}}, \quad (5)$$

где  $a_{im}$  — ускорение, с которым труба внедряется в грунт. Определим данное ускорение.

Для этого запишем систему уравнений, объединяющую закон сохранения энергии, закон сохранения импульса и коэффициент восстановления.

$$\frac{m_b U_b^2}{2} + \frac{m_{pr} U_{pr}^2}{2} = \eta \frac{m_b V_b^2}{2}. \quad (6)$$

$$m_b U_b + m_{pr} U_{pr} = m_b V_b. \quad (7)$$

$$k_{12} = \frac{U_{pr} - U_b}{V_b}, \quad (8)$$

где  $m_b$  — масса бойка ударной машины,  $m_{pr}$  — дополнительная масса трубы с наголовником, по которому бьет боек;  $V_b$  — доударная скорость центра масс бойка;  $U_b$ ,  $U_{pr}$  — послеударные скорости бойка и дополнительной массы трубы.

Преобразуем выражения (6–8).

$$\eta = \left( \frac{U_b}{V_b} \right)^2 + \frac{m_{pr}}{m_b} \left( \frac{U_{pr}}{V_b} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{U_b}{V_b} = - \frac{m_{pr}}{m_b} \frac{U_{pr}}{V_b} + 1. \quad (10)$$

$$k_{12} = \frac{U_{pr}}{V_b} - \frac{U_b}{V_b}. \quad (11)$$

Объединим выражения (10) и (11).

$$U_{pr} = (k_{12} + 1) V_b \frac{m_b}{(m_b + m_{pr})}. \quad (12)$$

Как известно,

$$V = at, \quad (13)$$

где  $V$  — скорость;  $a$  — ускорение;  $t$  — время. Зная время действия ударного ускорения  $t_{im}$  и скорость  $U_{pr}$  из выражения (12), можно определить величины  $a_{im}$ ,  $m_{pr}$  и, следовательно, оценить значения КПД передачи кинетической энергии.

$$a_{im} = \frac{U_{pr}}{t_{im}}. \quad (14)$$

$$a_{im} = (k_{12} + 1) V_b \frac{m_b}{(m_b + m_{pr}) t_{im}}. \quad (15)$$

Объединим выражения (12) и (5).

$$(k_{12} + 1)V_b \frac{m_{pr} m_b}{(m_b + m_{pr}) t_{im}} = \left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g. \quad (16)$$

$$m_{pr} = \frac{\left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im} m_b}{(k_{12} + 1)V_b m_b - \left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im}}. \quad (17)$$

Применим выражение (1) для рассмотренного случая.

$$\eta = \frac{m_{b^2} V_{b^2} + m_{pr^2} V_{pr^2} + 2m_b m_{pr} V_b V_{pr} +}{(m_b V_b^2 + m_{pr} V_{pr}^2) (m_b + m_{pr})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ m_b m_{pr} k_{12}^2 (V_{b^2} - 2V_b V_{pr} + V_{pr^2})}{(18)}$$

При условии  $V_{pr} = 0$ , получим:

$$\eta = \frac{m_b + m_{pr} k_{12}^2}{m_b + m_{pr}}. \quad (19)$$

Объединим выражения (17) и (19).

$$m_b + \frac{\left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im} m_b}{(k_{12} + 1)V_b m_b - \left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im}} k_{12}^2$$

$$\eta = \frac{m_b + \frac{\left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im} m_b}{(k_{12} + 1)V_b m_b - \left( m_g + \frac{\pi d^2}{4} l \rho \right) f g t_{im}}}{(20)}$$

Сокращаем (20).

$$\eta = 1 - \frac{\left( \frac{m_g}{m_b} + \frac{\pi d^2 l \rho}{4 m_b} \right) f g t_{im} (1 - k_{12})}{V_b}. \quad (21)$$

Время действия ударного ускорения  $t_{im}$  определяется с учетом выражения (2). Для нашего случая уравнение (21) должно быть равно (2).

$$\frac{m(1 - k_{12}^2)}{(1 + m)} = \frac{\left( \frac{m_g}{m_b} + \frac{\pi d^2 l \rho}{4 m_b} \right) f g t_{im} (1 - k_{12})}{V_b}. \quad (22)$$

С учетом того, что  $m = \left( \frac{m_g}{m_b} + \frac{\pi d^2 l \rho}{4 m_b} \right)$ , получим

$$t_{im} = \frac{(1 + k_{12}) V_b m_b}{\left( m_b + m_g + \frac{\pi d^2 l \rho}{4} \right) f g}. \quad (23)$$

В уравнении (21) величина  $\eta$  зависит от величин  $m$ ,  $m_b$ ,  $V_b$  и  $k_{12}$ . Произвести точные вычисления коэффициента восстановления  $k_{12}$  сложно. В ряде работ данный коэффициент определялся экспериментально. Например, коэффициент восстановления при ударе стальной сферы  $\varnothing 2,54$  см по неподвиж-

ной толстой чугунной плите с начальной скоростью удара  $V = 1,5$  см/с равен  $k_{12} = 0,7$  [2, С. 338]. Для рассматриваемых случаев, когда энергия удара серийного пневмоударника изменяется в диапазоне от 83 Дж до 9000 Дж, можно ввести гипотезу, что величина равна  $k_{12} = 0,2 - 0,3$ . Как правило, величина  $V_b$  изменяется в пределах 3,5–5 м/с.

Таким образом, для повышения величины  $\eta$  необходимо определить величину массы бойка  $m_b$ . В практике стремятся обеспечить диапазон изменения  $m - 0,9 \leq m \leq 1$ . Однако для рассматриваемого случая существенное значение имеет длина внедрения трубы в основание дороги — 1.

**Техническая реализация гипотезы.** Рассмотрим два примера расчета массы бойка  $m_b$  для следующих случаев прокола основания автомобильной дороги.

Исходные данные.

1. Длина трубы  $L = 10$  м. Стандартная двухполосная автомобильная дорога имеет две полосы по 3 м и две обочины по 1,5 м. Длина свободных концов трубы, выходящих из основания дороги, — 1 м.

2. Глубина заложения трубы в основание дороги — 2 м (условие для исключения провала грунта выше трубы).

3. Коэффициент сухого трения  $f = 0,4$  (сталь по песку). Однако при виброударе по внешней и внутренней поверхности трубы распространяются ударные поверхностные волны Рэлея, которые значительно меняют физическую картину сухого трения стали о песок. В результате действия волны Рэлея на песок отдельные песчинки, соприкасающиеся с поверхностью трубы, ведут себя как катящиеся сферы. Поэтому коэффициент сухого трения  $f = 0,4$  (сталь по песку) значительно снижается. Примем гипотезу, что труба по поверхности песка перемещается подобно перемещению по шариковой опоре с коэффициент трения качения  $f = 0,1$ .

4. Плотность уплотненного песка в основании дороги  $\rho = 2030$  кг/куб. м.

5. Скорость бойка  $V_b = 4,5$  м/с.

6. Примем величину коэффициента восстановления  $k_{12} = 0,25$ .

Вариант 1.

Масса трубы с наголовником  $m_g = 270$  кг. Для диаметра трубы  $D = 0,5$  м и толщины стенки трубы — 20 мм, масса трубы составляет по справочнику — 246 кг. Массу наголовника трубы примем 24 кг.

Подставим приведенные выше величины в выражения (21) и (23).

$$t_{im} = \frac{5,74 m_b}{(m_b + 270 + 392)}. \quad (24)$$

$$\eta = 1 - \left( \frac{270}{m_b} + \frac{392}{m_b} \right) \cdot \frac{0,937 m_b}{m_b + 270 + 392}. \quad (25)$$

Преобразуем выражение (25).

$$\eta = 1 - 270(1 + 1,451) \cdot \frac{0,937}{m_b + 270 + 392}. \quad (26)$$

$$\eta = 1 - (1 + 1,451) \cdot \frac{253}{m_b + 270 + 392}. \quad (27)$$

Для построения графиков зависимости величины  $\eta$  от величины массы бойка  $m_b$  выберем дискретные значения длины погружения трубы  $l$  в основание дороги.

$$l=0 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{253}{m_b + 270}; \quad l=1 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{620}{m_b + 662};$$

$$l=2 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{987}{m_b + 1054}; \quad l=3 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{1354}{m_b + 1446};$$

$$l=4 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{1720}{m_b + 1838}; \quad l=5 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{2087}{m_b + 2230};$$

$$l=6 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{2454}{m_b + 2622}; \quad l=7 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{2821}{m_b + 3014};$$

$$l=8 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{3188}{m_b + 3406}; \quad l=9 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{3555}{m_b + 3798}.$$

Вариант 2.

Масса трубы с наголовником  $m_g$  — 80 кг. Для диаметра трубы  $D$  — 0,15 м при толщине стенки трубы — 20 мм масса трубы составляет по справочнику — 73 кг. Массу наголовника трубы примем 7 кг.

Подставим приведенные выше величины в выражение (21) и (23).

$$t_{im} = \frac{5,74m_b}{(m_b + 80 + 34l)}. \quad (28)$$

$$\eta = 1 - (1 + 0,425l) \cdot \frac{75}{m_b + 80 + 34l}. \quad (29)$$

Для построения графиков зависимости величины  $\eta$  от величины массы бойка  $m_b$  выберем дискретные значения длины погружения трубы  $l$  в основание дороги.

$$l=0 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{75}{m_b + 80}; \quad l=1 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{107}{m_b + 164};$$

$$l=2 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{139}{m_b + 248}; \quad l=3 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{171}{m_b + 332};$$

$$l=4 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{203}{m_b + 416}; \quad l=5 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{234}{m_b + 500};$$

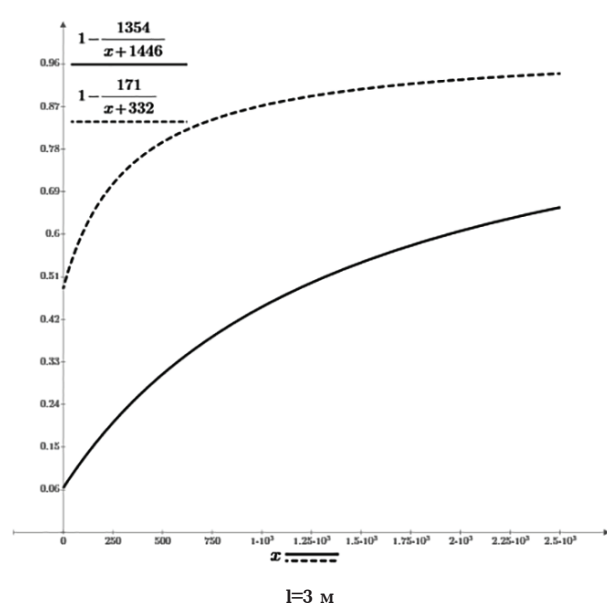
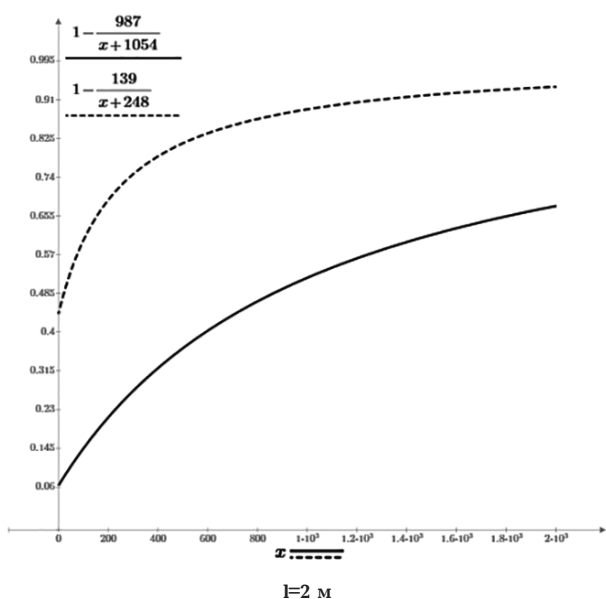
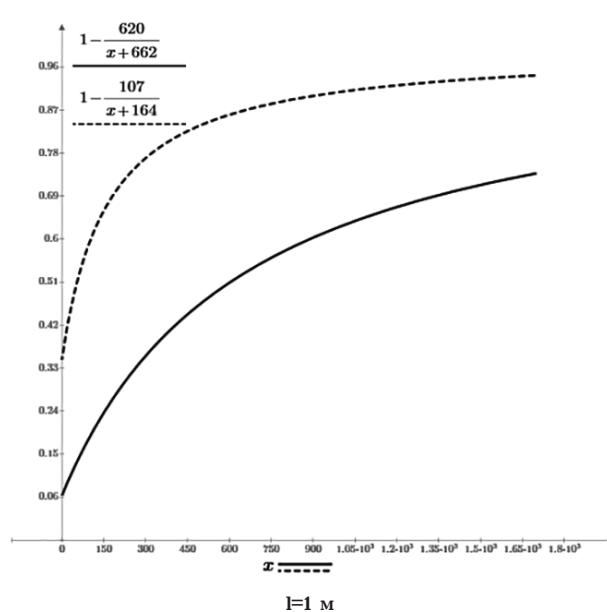
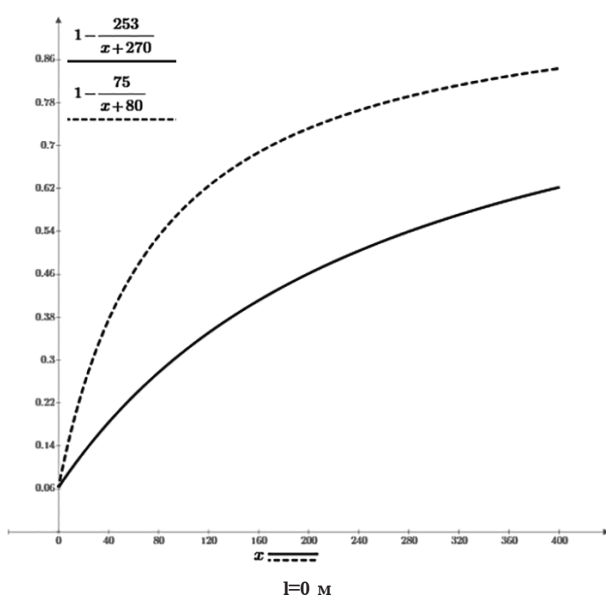
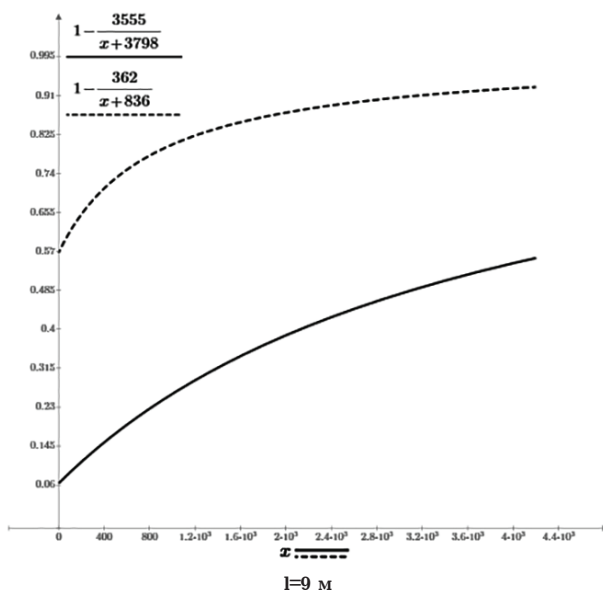
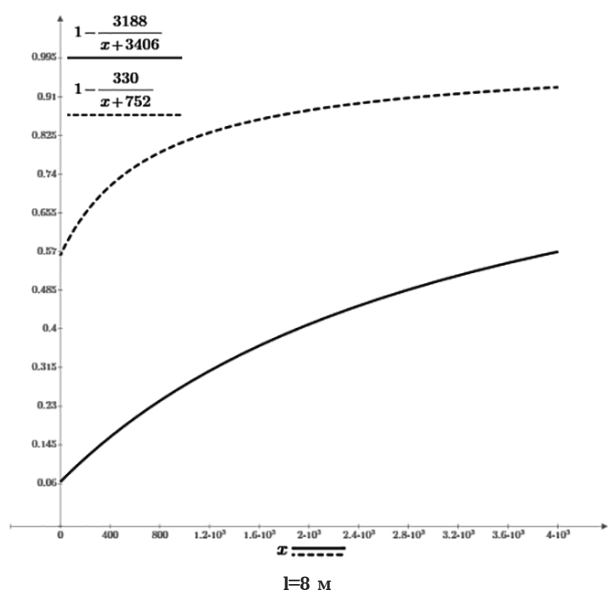
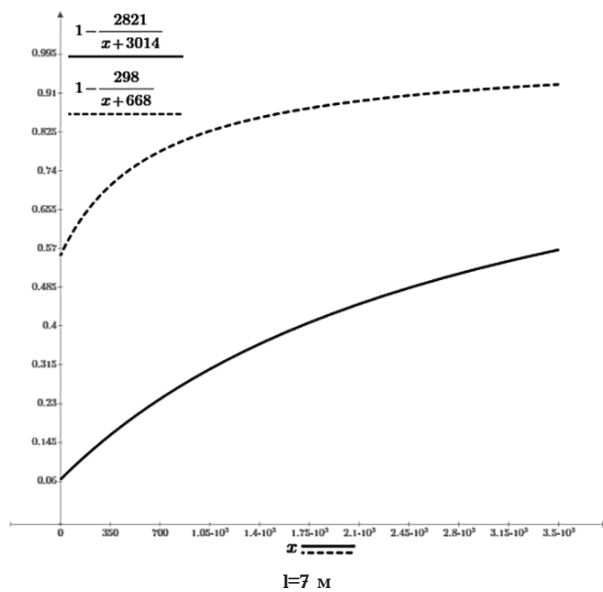
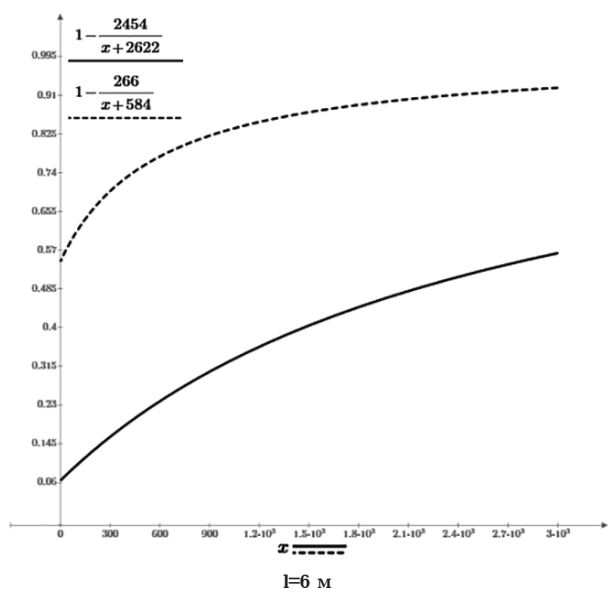
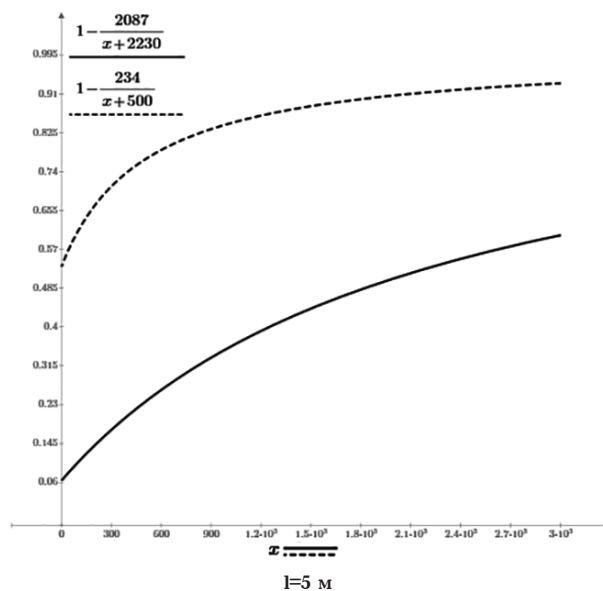
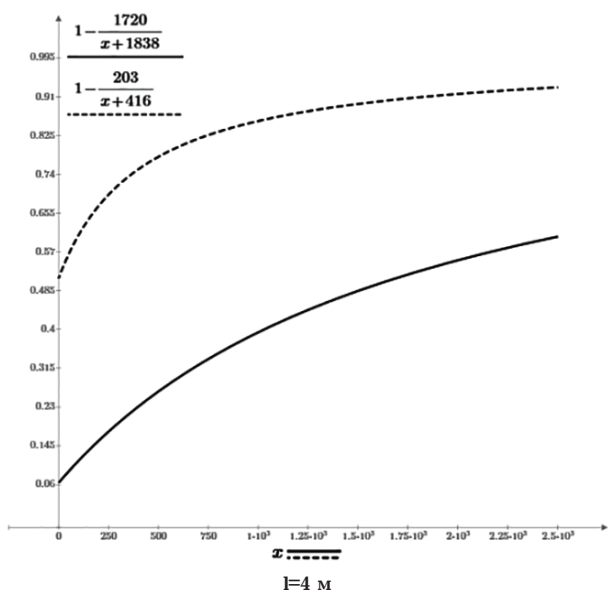


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента передачи кинетической энергии  $\eta$  от величины массы бойка  $m_b$ . (Вариант 1 — сплошная линия, вариант 2 — прерывистая линия)





Продолжение рис. 2. Зависимость величины коэффициента передачи кинетической энергии  $\eta$  от величины массы бойка  $m_b$ , (Вариант 1 — сплошная линия, вариант 2 — прерывистая линия)

$$l=6 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{266}{m_b + 584}; \quad l=7 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{298}{m_b + 668};$$

$$l=8 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{330}{m_b + 752}; \quad l=9 \text{ м, } \eta = 1 - \frac{362}{m_b + 836}.$$

На рис. 2 приведены графики зависимости величины коэффициента передачи кинетической энергии  $\eta$  (значения на оси  $y$ ) от величины массы бойка  $m_b$  (значения на оси  $x$ ) при различных значениях глубины погружения трубы в грунт  $l$ .

**Выводы и заключение.** При анализе полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Величина массы бойка  $m_b$  при прочих равных условиях оказывает главное действие на величину коэффициента передачи кинетической энергии  $\eta$ . Чем больше масса бойка  $m_b$ , тем эффективнее осуществляется технологический процесс забивки трубы в грунт. Данный вывод является следствием закона сохранения импульса. Повышение скорости бойка при сохранении величины его массы представляет собой более сложную проблему при проектировании ударной машины. Это связано с необходимостью повышения давления сжатого воздуха во внутренних полостях ударной машины. Решение данной задачи требует повышения прочности элементов конструкции машины.

2. Предложенная методика расчета массы бойка  $m_b$  позволяет произвести выбор ударной машины для проведения горизонтальной ударной забивки заданного диаметра трубы в грунт. В случае отрицательного результата расчетов ударного взаимодействия для ударной машины, имеющейся в строительной организации, необходимо использовать более мощную ударную машину либо применить другую технологию прокола основания дорожного полотна. Например, прокол пневмопробойником грунта с дальнейшей протяжкой трубы, изготовленной из пластических материалов. Однако такие трубы имеют другие технические условия эксплуатации в отличие от стальных труб.

3. Для повышения эффективности ударной забивки стальных труб в грунт необходимо периодически извлекать накопившийся грунт из трубы. Это позволит снизить дополнительную массу трубы и более эффективно использовать технические параметры пневмопробойника.

4. При анализе графиков на рис. 2 можно сделать вывод, что по мере увеличения диаметра трубы эффективность ударной забивки пневмопробойником снижается. Это вызвано тем, что при увеличении диаметра трубы масса трубы увеличивается в  $n$  раз, а масса грунта, находящегося внутри трубы, увеличивается примерно в  $n^2$  раз. Таким образом, более целесообразно забить несколько труб малого диаметра, чем одну трубу большого диаметра.

5. Из практики эксплуатации ударных машин известно, что необходимо стремиться к  $m=1$ , т.е. к равенству массы бойка  $m_b$  и трубы  $m_g$ . Однако в нашем случае необходимо стремиться к диапазону изменения  $3,5 \leq m \leq 4$ . Это связано с тем, что пневмопробойник может применяться для забивки труб различного диаметра и на различную длину.

#### Библиографический список

1. Jonson K. L. Contact mechanics. University of Cambridge, Cambridge University Press, 1985. 462 p. DOI: 10.1017/CBO9781139171731.

2. Goldsmith W. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids. London: Arnold, 1960. 379 p.

3. Stronge W. J. Impact mechanics. University of Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 300 p.

4. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем: моногр. М.: Наука, 1969. 201 с.

5. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел: моногр. Киев: Наукова Думка, 1969. 122 с.

6. Алабушев П. М., Стихановский Б. Н., Шпигельбурд И. Я. Введение в теорию удара. Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1970. 158 с.

7. Стихановский Б. Н. Передача энергии ударом / Омский политехнический ин-т. Омск, 1986. 180 с. Деп. в ВИНТИ № 8115 В86.

8. Akkas N., Barez F., Goldsmith W. Elastic wave propagation in an exponential rod // International Journal of Mechanical Sciences. 1980. Vol. 22, Issue 4. P. 199–208.

9. Arakawa K., Mada T., Komatsu H. [et al.]. Dynamic deformation behavior of a golf ball during normal impact // Experimental Mechanics. 2009. Vol. 49, Issue 4. P. 471–477. DOI 10.1007/s11340-008-9156-y.

10. Chernyavskii D. I., Strength design for the elements of mining machines under elastoplastic impact // Journal of Mining Science. 2002. Vol. 38, Issue 1. P. 80–86. DOI: 10.1023/A:1020205105249.

11. Chernyavskii D. I., Chernyavskaya D. D. Formation of a plane shock-wave front in rods // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29, Issue 8. P. 775–777. DOI: 10.3103/S1068798X09080061.

12. Connesson N., Maquin F., Pierron F. Experimental energy balance during the first cycles of cyclically loaded specimens under the conventional yield stress // Experimental Mechanics. 2011. Vol. 51. P. 23–44. DOI 10.1007/s11340-010-9336-4.

13. Goldsmith W., Polivka M., Yang T. Dynamic behavior of concrete // Experimental Mechanics. 1966. Vol. 6, no. 2. P. 65–69.

14. Golubev V. K., Medvedkin V. A. Penetration of a rigid shell into a steel obstacle at moderate impact velocities // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2000. Vol. 41, no. 1. P. 32–34.

15. Hacini L., Van Lê N., Bocher P. Evaluation of residual stresses induced by robotized hammer peening by the contour method // Experimental Mechanics. 2009. Vol. 49. P. 775–783. DOI 10.1007/s11340-008-9205-6.

16. Jamjian M., Sackman J. L., Goldsmith W. Response of an infinite plate on a honeycomb foundation to a rigid cylindrical impactor // International Journal of Impact Engineering. 1994. Vol. 15, Issue 3. P. 183–200. DOI: 10.1016/S0734-743X(05)80012-0.

17. Kenner V. H., Goldsmith W. Elastic waves in truncated cones // Experimental Mechanics. 1968. Vol. 8, no. 10. P. 442–449. DOI: 10.1007/BF02327408.

18. Salisbury C. P., Cronin D. S. Mechanical properties of ballistic gelatin at high deformation rates // Experimental Mechanics. 2009. Vol. 49. P. 829–840. DOI 10.1007/s11340-008-9207-4.

19. Suh S. L., Goldsmith W., Sackman J. L. [et al.]. Impact on a transversely anisotropic half-space. International // Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1974. Vol. 11, Issue 11. P. 413–421.

20. Wang K., Chao Y. J., Zhu X. [et al.]. Dynamic separation of resistance spot welded joints: part II—analysis of test results and a model // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50. P. 901–913. DOI 10.1007/s11340-009-9277-y.

21. Wang Z. G., Meyer L. W. On the plastic wave propagation along the specimen length in SHPB test // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50. P. 1061–1074. DOI 10.1007/s11340-009-9294-x.

22. Wu E., Goldsmith W. Normal impact of blunt projectiles on moving targets: Analytical considerations // International Journal of Impact Engineering. 1990. Vol. 9, Issue 4. P. 405–432.

23. Wu E., Goldsmith W. Normal impact of blunt projectiles on moving targets: experimental study // *International Journal of Impact Engineering*. 1990. Vol. 9, Issue 4. P. 389–404.

24. Zhang L., Hu S.-S., Chen D.-X. [et al.]. An experimental technique for spalling of concrete // *Experimental Mechanics*. 2009. Vol. 49. P. 523–532. DOI 10.1007/s11340-008-9159-8.

25. Chernyavskii D. I., Chernyavskaya D. D. Mechanical impact in nanotechnology // *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31. P. 668. DOI: 10.3103/S1068798X11070045.

26. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами: свод правил. СП 249.1325800.2016. Введ. 2016–01–10. М.: Изд-во стандартов, 2016. 100 с.

27. Смоленцев А. С. Оценка влияния элементов ударной системы пневмомолота на эффективность погружения в грунт обсадной трубы при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. Новосибирск, 2012. 20 с.

28. Petreev A. M., Smolentsev A. S. Blow energy transmission from a striking machine element to a pipe via adaptor // *Journal of mining science*. 2011. Vol. 47, no 6. P. 787–797.

29. Гилета В. П., Тищенко И. В., Ванга Ю. В. Повышение эффективности циклической проходки скважин в грунте // *Вестник СибАДИ*. 2017. Вып. 3 (55). С. 21–31.

30. Пневмоударные машины «Тайфун» / Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук: сайт. URL: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10102/> (дата обращения: 28.05.2018).

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Менеджмент».

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

**ГАПОН (ЧЕРНЯВСКАЯ) Дарья Дмитриевна**, аспирант кафедры «Основы теории механики и автоматического управления».

SPIN-код: 7159-8507

Адрес для переписки: maneg1@omgtu.ru

#### Для цитирования

Чернявский Д. И., Гапон Д. Д. Применение законов сохранения энергии и импульса при проведении бестраншейной горизонтальной прокладке коммуникаций // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 10–17. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-10-17.

Статья поступила в редакцию 08.06.2018 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Гапон