

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 624.1 + 534.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАБИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ В ГРУНТ С ПОРЦИОННЫМ УДАЛЕНИЕМ ГРУНТОВОГО КЕРНА

А. Л. Исаков, А. С. Кондратенко, А. М. Петреев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: kondratenko@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано взаимодействие открытой трубы с внутренней грунтовой пробкой по закону сухого трения Кулона. Рассмотрены различные модели грунта и трубы. Для всех моделей получены конечно-разностные решения, для некоторых — аналитические, описывающие процесс упругого взаимодействия трубы с пробкой. Показано хорошее соответствие численных и аналитических решений. Проведено сопоставление результатов численных расчетов по различным моделям и определены пределы применимости моделей. Изучено влияние сухого трения Кулона на процесс движения трубы и пробки.

Погружение трубы, грунтовая пробка, сухое трение, сдвиговое напряжение, математическое моделирование, нелинейность, численный метод, аналитическое решение

DOI: 10.15372/FTPRPI20190405

Открытый способ прокладки труб — наиболее используемый метод для установки или восстановления подземных коммуникаций. Однако он требует значительных трудозатрат, связанных со вскрытием дневной поверхности, укладкой трубопровода и последующим восстановлением поверхностного слоя [1]. Эти продолжительные операции неблагоприятно влияют на повседневную жизнь из-за перекрытия автомобильных магистралей, затрудняют доступ к домам и объектам инфраструктуры [2]. При прокладке труб под железнодорожными магистралями открытый способ неприемлем.

В этой связи строители применяют бестраншейные методы монтажа подземных трубопроводов, которые решают многие логистические проблемы. В частности, ударное погружение труб с открытым передним концом в грунтовой массив является простым бестраншейным строительным методом, который позволяет осуществить установку трубопровода в сложных обводненных или слабых грунтах с крупными твердыми включениями [3]. Такие горно-геологические условия представляют большую трудность для других бестраншейных мето-

дов. Ударное погружение труб предпочтительно при неглубоком заложении проектной оси трубопровода, при пересечении автомобильных и железных дорог, поскольку позволяет исключить возможность деформации дневной поверхности как в процессе строительства, так и во время последующей эксплуатации пересекаемого участка магистрали [4]. Создание в грунте приповерхностных коммуникационных каналов путем забивания трубы с открытым передним концом — один из эффективных, а зачастую и безальтернативный вариант бестраншейных технологий.

Для совершенствования этого способа необходимо сократить время на очистку забиваемой трубы от поступающего в нее грунта (керна), вырезаемого из массива, поскольку способы его удаления весьма трудоемки и продолжительны. Перспективным решением выступает порционное удаление керна путем периодического выталкивания его из трубы наружу воздушно-водяной смесью, которая под давлением подается в переднюю часть трубы по внешнему питающему каналу [5]. Принцип порционного удаления показан на рис. 1.

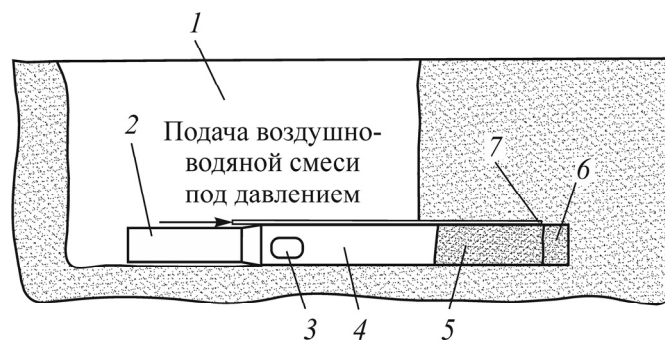


Рис. 1. Схема бестраншейной прокладки трубопровода с порционным удалением керна: 1 — стартовый котлован; 2 — ударный привод; 3 — окно для выхода удаляемого грунта; 4 — забиваемая труба; 5 — удаляемая порция керна; 6 — пробка; 7 — питающий канал

Полагаем, что изначально имеется однородный грунтовый массив. Все его частицы находятся под действием гравитационного поля и характеризуются единообразными параметрами внутренних структурных связей. Это вязкоэластичные водно-коллоидные связи, а также жесткие кристаллические, обусловленные выпадением из поровой воды солей железа, карбоната кальция, магния и т. п. Жесткие связи, в отличие от вязкоэластичных, после нарушения длительный период не восстанавливаются.

Исходное состояние массива нарушается сооружением стартового котлована для размещения первой секции трубы и ударного привода (рис. 1). Грунтовые слои обнажаются на глубину заложения трассы. Гравитационный подпор со стороны котлована исчезает, и откос удерживается за счет изменения ранее существовавшего напряженного состояния в прилегающей к откосу части грунтового массива. Область изменения напряженного состояния зависит от состава грунта, глубины котлована и т. д. Ударное продвижение трубы в грунт начинают при сниженных значениях энергии ударов и, соответственно, силы отдачи, оттягивающей назад ударный привод вместе с трубой. Штатный режим включается только после внедрения трубы на величину, при которой обжатие трубы грунтом снаружи будет достаточным, чтобы удержать ее от обратного смещения силой отдачи ударного привода. В штатном режиме ведется основная проходка [6].

В технологии порционной очистки поступающий в трубу грунт делится на две части (рис. 1). Раздел проходит в зоне ввода в трубу питающего канала. Передняя часть керна (пробка на рис. 1 справа) имеет постоянную длину. Она препятствует прорыву текучей среды через

передний торец трубы в затрубное пространство. Задняя часть за входом питающего канала — удаляемая порция. Ее длина определяется перемещением трубы после предшествовавшей очистки и может управляться оператором путем изменения продолжительности забивки трубы до очередной очистки. После удаления очередной порции пробка остается в трубе. Если принять, что толщина стенок трубы пренебрежимо мала по сравнению с ее диаметром, то можно считать, что пробка вырезается из массива тонким кольцевым ножом и радиальное воздействие окружавшего ее грунтового массива замещается по контуру реакцией стенок трубы. Это привнесенное из массива упругое радиальное взаимодействие пробки с трубой создает на внутренней поверхности трубы силу трения. Чем больше длина керна, тем больше суммарная сила трения и тем сильнее керн поддавливает массив перед трубой. Сила трения “труба – керн” меняется по длине керна от минимальной на открытом конце до наибольшего значения у переднего торца трубы [7].

После отделения и удаления порции торец пробки освобождается. Подпор со стороны удаленной части керна исчезает. Напряженное состояние оставшейся части грунта меняется, радиальное давление пробки на стенки трубы и сила трения снижаются. Данное обстоятельство позволяет при создании упрощенной расчетной модели системы “труба – керн” считать, что параметры состояния грунта в пробке выходят на уровень исходного состояния грунта в массиве. Отрыв и удаление порции не сказывается на силе трения грунта по наружной поверхности трубы, которая непрерывно возрастает по мере продвижения трубы вглубь массива.

Такая картина может соответствовать ситуации, когда кроме трения о стенки трубы, гравитации и давления на торец со стороны массива иные внешние воздействия на керн отсутствуют. Естественно, на эту базовую часть представления о формировании керна могут накладываться влияния дополнительных факторов. При ударном погружении трубы в течение всего времени перемещения по ней ударной волны грунт в трубе и снаружи подвержен радиально направленному вибрационному воздействию, исходящему от трубы, возбужденной ударными импульсами ударного привода [8,9]. Частота ударов обычно находится в диапазоне 1–10 Гц при продолжительности ударных воздействий между очередными очистками 5–20 мин и более [10]. Каждый удар возбуждает в трубе прямые и отраженные волны сжатия и растяжения. При прохождении волны сжатия диаметр трубы увеличивается пропорционально амплитуде силы в ударном импульсе, и наоборот, уменьшается в волне растяжения, т. е. труба постоянно “дышит” [11]. Вследствие неизбежного нецентрального удара и кривизны трубы возникают поперечные колебания. Это способствует ослаблению внутренних грунтовых связей, уменьшению плотности керна, снижению коэффициента трения “труба – керн”.

Поскольку глубина заложения приповерхностных коммуникаций в большинстве случаев находится в пределах 2–15 м, исходная плотность грунта, обусловленная гравитацией, невелика [12]. Это увеличивает влияние различия гравитационного давления и, соответственно, сил трения в верхних и нижних слоях находящегося в трубе грунта, особенно в трубах большого диаметра. При удалении керна сжатым воздухом верхние слои порции вследствие меньшего сопротивления трения могут легче выдвигаться, образуя значительный канал утечки, приводящий к падению выталкивающего давления и прекращению движения порции керна на выход [13]. Такая опасность характерна для сыпучих грунтов. Наличие питающего канала позволяет подать в грунтовую порцию текучую среду для повышения сцепления и связности грунтовой порции. Использование такого приема допускает при создании расчетной модели представлять грунт связным.

Исследуем квазистатическую задачу об ударном погружении металлической трубы в грунт с моделированием процессов формирования и поведения внутри нее грунтового керна при следующих допущениях.

I. Решается осесимметричная задача, где осевые напряжения и перемещения в кернах усреднены по сечению трубы.

II. Труба рассматривается как твердое недеформируемое тело.

III. Контакт поверхностей трубы с грунтом происходит по закону сухого трения.

IV. Толщина стенок трубы считается пренебрежимо малой.

V. КERN формируется из грунта, находящегося в сжатом состоянии, под воздействием горного давления p_h .

VI. Деформирование грунтового массива на контакте с кернами в процессе его формирования происходит по закону вдавливания жесткого цилиндра в упругое полупространство.

VII. В случае, когда труба с кернами движутся как единое недеформируемое тело, его лобовое сопротивление определяется по закону внедрения грунтового конуса в массив грунта.

VIII. Считается, что сила отдачи ударного привода полностью компенсируется силой трения между массивом и наружной поверхностью трубы.

Прежде чем перейти к математическому описанию процесса внедрения металлической трубы в грунт, определим силы, действующие на объект. Согласно допущению V, на начальной стадии формирования керна поступающий в трубу грунт наряду с лобовой нагрузкой испытывает боковые напряжения сжатия, равные p_h (рис. 2).



Рис. 2. Начальная стадия формирования керна в трубе

Уравнение равновесия сформированного в трубе керна запишем в виде

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2pk_f k}{R_0} + \frac{2p_h k_f}{R_0}, \quad (1)$$

где p — усредненные по сечению трубы осевые напряжения; $p_h = \rho gh$ — горное давление на глубине забивания трубы h , ρ — плотность грунта; R_0 — радиус трубы; k_f — коэффициент трения грунта о стенки трубы; k — коэффициент бокового распора грунта.

Решение (1) с граничным условием $p(x) = 0$ при $x = 0$ дает

$$p(x) = \frac{P_h}{k} \left[e^{2\bar{x}k_f k} - 1 \right], \quad \bar{x} = \frac{x}{R_0}. \quad (2)$$

Принимая допущение V и используя (2), нормальное давление керна на внутреннюю поверхность трубы P_n как функцию x представим в виде $P_n(x) = kp(x) + p_h$. Тогда суммарная сила трения керна о стенки трубы, вызываемая боковым распором, определится выражением

$$F_f^k = 2\pi R_0 k_f \int_0^{L_k} P_n dx = \frac{\pi R_0^2 p_h}{k} \left[e^{2\bar{L}_k k_f k} - 1 \right],$$

где $\bar{L}_k = L_k / R_0$, L_k — длина керна; k — коэффициент бокового распора грунта.

Сила бокового трения трубы, погруженной в грунт, равна $F_f = 2\pi R_0 L p_h k_f$, L — длина части трубы. Схема размещения керна в трубе показана на рис. 3, где F_e — упругая реакция грунтового массива.

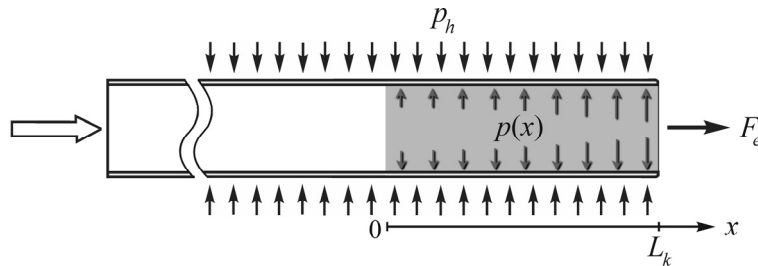


Рис. 3. Схема размещения керна в трубе

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В начальный момент времени металлической трубе массой M и радиусом R_0 , находящейся на глубине h от свободной поверхности и погруженной в массив грунта на длину L с размещенным в ней керном длиной L_k , передается импульс, генерируемый пневмоударной машиной с энергией удара A_0 . Требуется определить динамику системы “труба–кern” в рамках ударного цикла.

С учетом допущения II труба как твердое недеформируемое тело в результате воздействия на нее ударного импульса приобретает начальную скорость V_0 , определяемую из условия передачи ей кинетической энергии A . Коэффициент передачи трубе кинетической энергии, генерируемой пневмоударной машиной:

$$k_A = A / A_0 \quad (3)$$

находится согласно [14] при помощи алгоритма, реализованного в программе ShockPulse. Зная энергию удара пневмоударной машины A_0 и коэффициент k_A , а следовательно и A в соответствии с (3), скорость, приобретаемая трубой в начале ударного цикла, равна $V_0 = \sqrt{2A / M}$.

Рассмотрим возможные режимы, характеризующие динамику системы “труба–кern”.

Первый режим. Движение трубы и расположенного в ней грунтового керна происходит раздельно. Такой режим реализуется на стадии формирования керна в трубе, когда скорость движения трубы превышает скорость движения керна, в результате чего наблюдается интенсивное приращение его длины. В этом случае динамика системы “труба–кern” описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M \frac{d^2 U}{dt^2} = -(F_f^k + F_f), \\ M_k \frac{d^2 W}{dt^2} = F_f^k + F_e \end{cases} \quad (4)$$

с начальными условиями $U = W = 0$, $dW / dt = 0$ и $dU / dt = V_0$ при $t = 0$, где U и W — перемещения соответственно трубы и керна, $M_k = \pi R_0^2 \rho L_k$ — масса керна. Упругая реакция массива при данном режиме записывается выражением

$$F_e^{(1)} = \frac{2R_0 E(W + W_0)}{1 - \nu^2}, \quad (5)$$

взятом с учетом допущения VI о деформировании упругого массива перед торцом трубы [15]. Здесь E , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона грунта; W — текущее перемещение керна; $W_0 = \min\{F_f^k(1-\nu^2)/2R_0E; F_f(1-\nu^2)/2R_0E\}$ — остаточное перемещение керна после завершения ударного цикла. Выражение (5) характеризует упругую реакцию массива грунта на перемещение керна до тех пор, пока в процессе ударного цикла остается проскальзывание керна вдоль трубы.

Динамика системы “труба–грунт” для первого режима реализована в алгоритме компьютерной программы PipeRamming [16]. В качестве примера рассчитано погружение трубы диаметром 630 мм с помощью пневмоударной машины с энергией удара 4000 Дж и частотой 2.8 Гц. На рис. 4 показаны графики скоростей трубы и керна при их раздельном движении на начальной стадии погружения, описываемой системой (4).

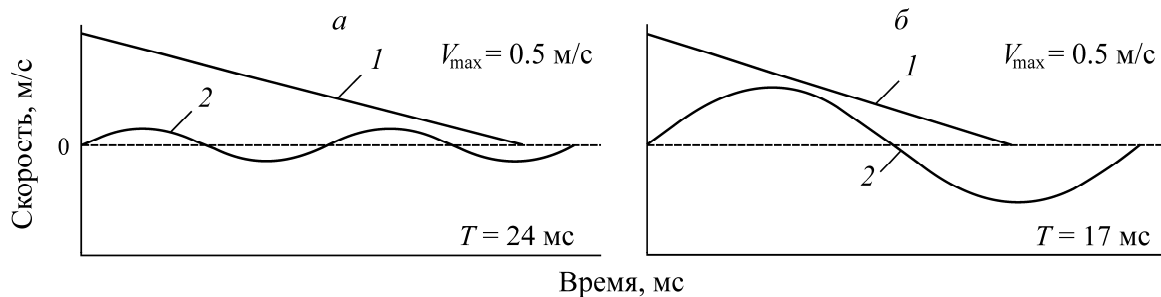


Рис. 4. Графики скоростей трубы (1) и керна (2) в ударном цикле: а — для $L = 1.20$ м, $L_k = 0.38$ м; б — для $L = 1.55$ м, $L_k = 0.75$ м

На этой стадии формирования керна, когда силы его трения о внутреннюю поверхность трубы пренебрежимо малы по сравнению с силами трения трубы по наружной поверхности, его влияние на движение трубы в грунте ничтожно. Этим объясняется возвратно-поступательное движение керна в трубе, подверженное влиянию упругой реакции массива. При этом труба движется равномерно.

Второй режим. Движение трубы и керна происходит совместно как единого твердого тела. Режим реализуется, когда упругой реакции массива недостаточно, чтобы преодолеть внутреннее трение керна в трубе. Для описания динамики системы “труба–кern” достаточно одного уравнения движения:

$$(M + M_k) \frac{dU^2}{dt^2} = -[F_f \operatorname{sgn}(V) + F_e^{(2)}], \quad U = U_*, \quad dU / dt = V_*, \quad t = t_*, \quad (6)$$

где $F_e^{(2)} = [2R_0E(U + W_0 - \Delta L_k)] / (1 - \nu^2)$, $\Delta L_k = U_* - W_*$ — приращение длины керна, U_* , W_* — перемещения трубы и керна соответственно к моменту начала их совместного движения в ударном цикле.

Критерием включения второго режима является равенство скоростей движения трубы и керна. На стадии формирования керна, при его незначительной длине, второй режим может включиться на непродолжительное время $\Delta t = t_{**} - t_*$, где t_* , t_{**} — время начала второго режима и его окончания (рис. 5а). По мере увеличения длины керна сила его трения о внутренние стенки трубы возрастает и наступает момент, когда совместное движение трубы и керна продолжается до конца ударного цикла (рис. 5б, в). Видно, что “разгон” керна начиная с нулевой скорости заканчивается в момент времени, когда скорости трубы и керна сравниваются. Дальнейшее движение трубы и керна происходит совместно. Приращение длины керна при этом заканчивается при $t = t_*$ (рис. 5з).

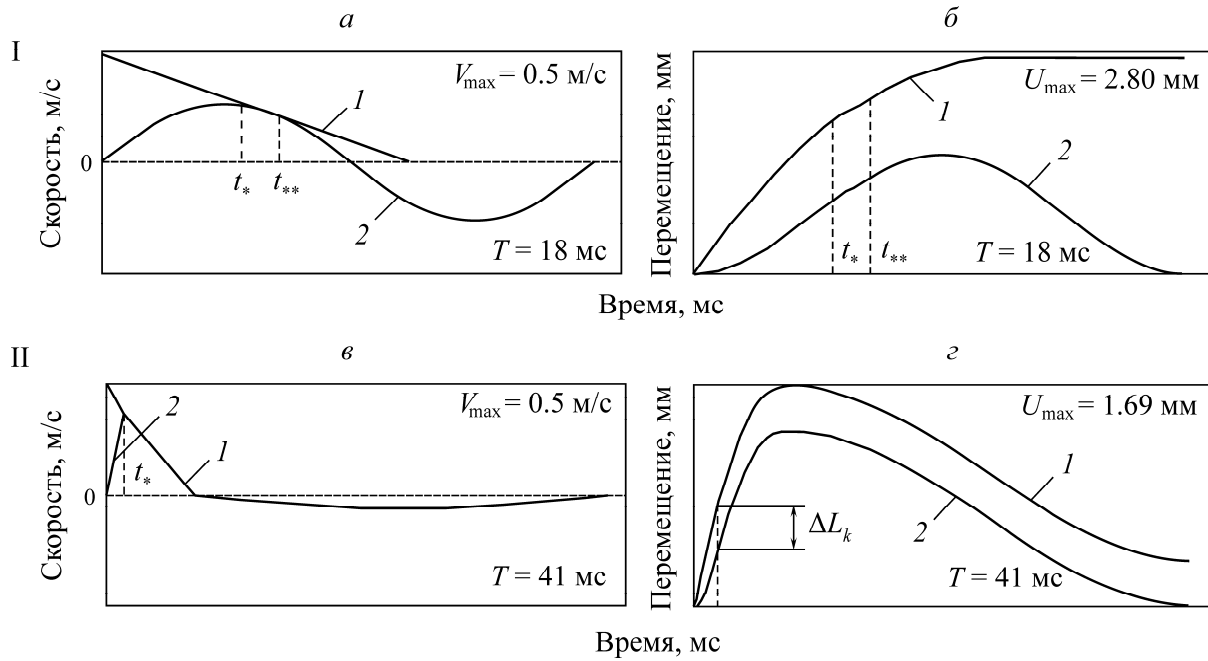


Рис. 5. Графики скоростей (а, в) и перемещений (б, г) трубы (1) и керна (2) в ударном цикле: I — $L=1.70$ м, $L_k=0.82$ м; II — $L=2.5$ м, $L_k=1.4$ м

По мере накопления деформации грунта в массиве перед торцом трубы упругая реакция массива $F_e^{(2)}$ будет расти до тех пор, пока там не сформируется грунтовый конус, лобовое сопротивление которого F_c постоянно и, согласно допущению VI, определяется выражением для сопротивления грунтового конуса, сформированного перед торцом трубы:

$$F_c = \pi R_0^2 P_0 \frac{1 + \operatorname{tg} \phi \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg} \phi \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)},$$

где ϕ — угол внутреннего трения грунта; P_0 — прессиометрическое давление грунта на глубине забивания трубы [17, 18].

Отсюда следует, что при выполнении неравенства $F_e^{(2)} > F_c$ в уравнении (6) необходимо заменить $F_e^{(2)}$ на F_c . На рис. 6 показан пример расчета скорости забивания трубы длиной 14 м, диаметром 630 мм, глубиной от поверхности земли 3 м, пневмоударной машиной с энергией ударов 4000 Дж и частотой ударов 2.8 Гц, выполненный с помощью программы Pipe-Ramming [16].

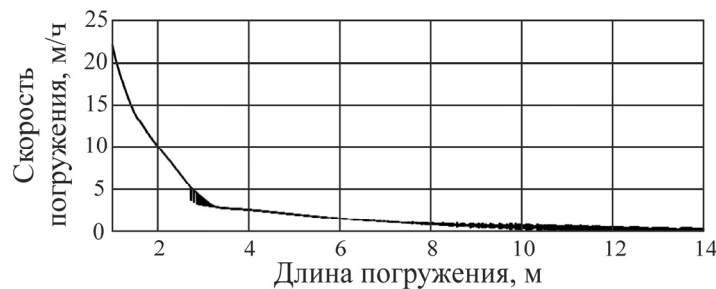


Рис. 6. График изменения скорости забивания трубы в грунт с открытым концом

Скорость продвижения трубы на первых двух-трех метрах снижается до 5 м/ч. При внедрении на расстояние ~ 9 м сила лобового сопротивления F_c увеличивается до значения, равного F_c . Дальнейшее продвижение трубы происходит аналогично забиванию с закрытым передним торцом. Скорость продвижения монотонно снижается до полной остановки погружения. Такой режим малопроизводителен и вследствие вытеснения керном грунта приводит к значительным радиальным деформациям окружающего грунтового массива. Кроме того, возрастает нагрузка на сварные соединения секций трубы, что способствует ее разрушению. Чтобы исключить вероятность развития подобного сценария, необходимо проводить своевременную очистку внутренней полости трубы от грунтового керна. Технологически удаление грунта реализуется с помощью желонки, шнеков или гидроразмывом [19–21]. Эти способы требуют остановки процесса погружения и демонтажа пневмоударной машины, что негативно сказывается на производительности сооружения скважины в целом.

На рис. 7а показано изменение скорости погружения трубы при работе на реальном объекте с использованием технологии порционного удаления грунта без демонтажа пневмоударной машины и прерывания процесса погружения [22, 23]. Трасса прокладывалась в техногенном грунте на глубине 3 м в зоне жилой застройки. Диаметр трубы 630 мм. Пневмоударная машина с энергией удара 4000 Дж. Протяженность измерения, ограниченная 7 м, связана с тем, что на этой отметке во внутреннюю полость трубы начали подавать воду с избыточным давлением 0.2 МПа для исследования влияния принудительного увлажнения грунтового керна. Также не учитывался начальный участок погружения длиной 1.4 м, который находится в заведомо разуплотненной зоне грунтового массива вблизи откоса котлована и на старте для снижения силы отдачи ударная машина работает на пониженном давлении.

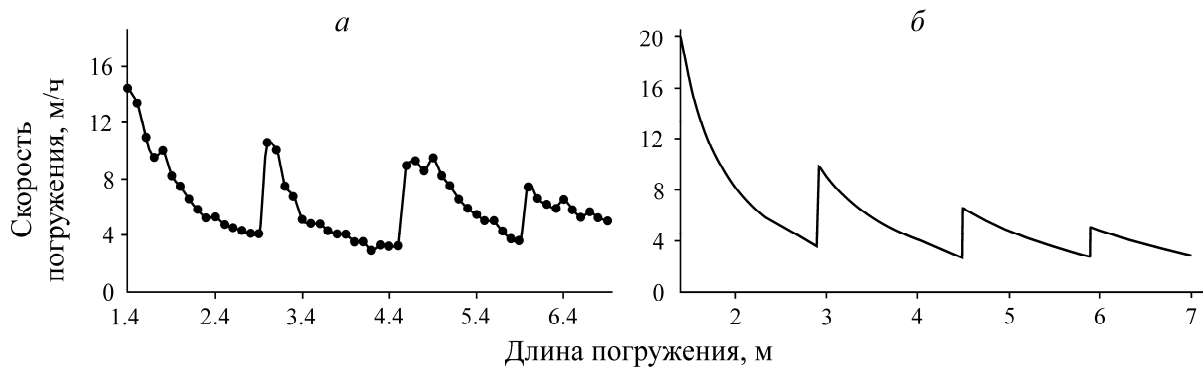


Рис. 7. Скорость продвижения трубы в грунте на строительной площадке (а) и расчетная скорость погружения трубы (б)

Для сравнения с помощью программы PipeRamming выполнен расчет скорости погружения трубы с периодической очисткой ее полости, аналогичной экспериментальной в грунтовых условиях, отражающих условия на данном объекте. Результаты расчета представлены на рис. 7б.

Сопоставляя графики на рис. 7, видно, что расчетная кривая хорошо описывает характер изменения скорости забивания трубы в грунт с порционным удалением керна. Теоретическое описание динамики такого процесса качественно иллюстрирует взаимодействие грунтового массива, трубы и керна, а расчетная программа при варьировании исходных параметров позволяет получать информацию, необходимую для предварительной оценки длительности проходки и требуемой ударной мощности. В качестве примера на рис. 8 представлены графики продвижения забиваемой трубы для двух вариантов проходки — с порционной очисткой и без очистки при одинаковых исходных данных, соответствующих описанному эксперименту.

Результаты расчета и эксперимента демонстрируют как возможности разработанного программного продукта, так и явные достоинства нового метода очистки трубы при ее забивании в грунт с открытым торцом.

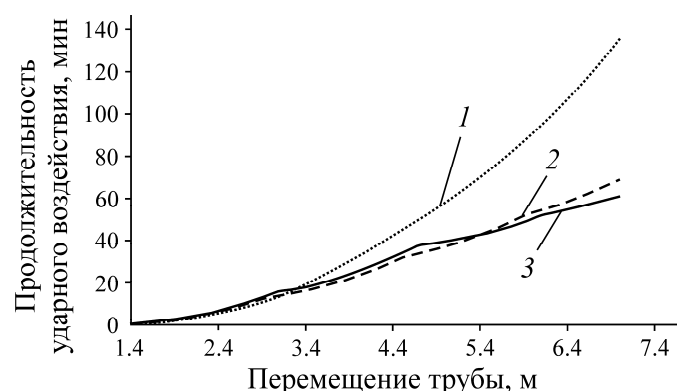


Рис. 8. Продолжительность погружения трубы: 1 — с порционной очисткой; 2 — без промежуточного удаления керна; 3 — результаты эксперимента

Из сопоставления кривых на рис. 8 видно, что в пределах отрезка 1.4–7.0 м, фигурирующего в примерах, приведенных на рис. 7, длительность процесса при порционной очистке керна сокращается в 2 раза и по мере дальнейшего продвижения забиваемой трубы эффект возрастает. На отметке 14 м затраты чистого времени продвижения трубы при использовании новой технологии сокращаются в 7 раз.

Описанная математическая модель забивания трубы в грунт с порционным удалением керна не включает в себя описание механизма дробления керна и его транспортирование. Дальнейшее развитие модели будет возможно с получением новой информации в процессе практического использования новой технологии.

ВЫВОДЫ

Сравнение экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об адекватности предложенной математической модели взаимодействия грунтового керна с забиваемой в грунт трубой. Программа PipeRamming, реализующая предложенную математическую модель, позволяет описывать скоростной режим погружения трубы с учетом периодического удаления грунта из внутренней полости трубы, а также осуществлять подбор требуемых параметров ударной машины, исходя из известных размеров трубопровода и грунтовых условий. Периодическое удаление грунта из внутренней полости трубы позволяет в 7 раз сократить время погружения трубы за счет периодического снятия трения в паре “труба – керн” в процессе погружения и пренебрежимо малой продолжительности процесса очистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий. Теория и практика. — М.: Пресс-Бюро, 2005. — 304 с.
2. Ariaratnam S., Chan W., and Choi D. Utilization of trenchless construction methods in mainland China to sustain urban infrastructure Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, Reston, VA, 2006, Vol. 11, No. 3. — P. 134–141.
3. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Пути повышения эффективности забивания в грунт стальных труб пневматическими молотами // ФТПРПИ. — 2005. — № 5. — С. 81–88.
4. Современные технологии сооружения протяженных скважин в грунтовых массивах и технические средства контроля их траектории / Б. Н. Смоляницкий, В. Н. Опарин, Е. В. Денисова, А. С. Кондра-

- тенко, И. В. Тищенко, А. С. Смоленцев, А. П. Хмелинин, А. И. Конурич. — Новосибирск: СО РАН, 2016. — 237 с.
5. Пат. РФ 2501913. Способ бестраншейной прокладки труб в грунт / А. М. Петреев, А. С. Кондратенко // Опубл. в БИ. — 2013. — № 35.
 6. Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 107–118.
 7. Aleksandrova N. I. Numerical-analytical investigation into impact pipe driving in soil with dry friction. Part II: Deformable external medium, J. Min. Sci., 2013, Vol. 49, No. 3. — P. 413–425.
 8. Петреев А. М., Смоленцев А. С. Передача энергии от ударного привода трубе через адаптер // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 64–73.
 9. Тищенко И. В., Червов В. В., Смоляницкий Б. Н. Обоснование конструктивной схемы пневмомолота с плавной регулировкой частоты ударных импульсов // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 110–117.
 10. Гилета В. П., Ванаг Ю. В., Тищенко И. В. Повышение эффективности проходки скважин методом виброударного продавливания // Вестн. КузГТУ. — 2016. — № 6. — С. 82–89.
 11. Александрова Н. И. О влиянии внутренней грунтовой пробки на процесс ударного забивания трубы // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 114–126.
 12. Meskele T. and Stuedlein A. Attenuation of pipe ramming-induced ground vibrations, J. Pipeline Systems Engineering and Practice, 2016, Vol. 7, No. 1. — P. 1–12.
 13. Данилов Б. Б. Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта // ФТПРПИ. — 2007. — № 5. — С. 52–61.
 14. Белобородов В. Н., Исаков А. Л., Плавских В. Д., Шмелев В. В. Моделирование процесса генерации ударного импульса при забивании металлических труб в грунт // ФТПРПИ. — 1997. — № 6. — С. 66–71.
 15. Тимошенко В. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1979. — 560 с.
 16. Свидетельство № 2018664377. Описание движения металлической трубы с керном при ее забивании в грунт с помощью пневмоударной машины (PipeRamming) / А. Л. Исаков, А. С. Кондратенко, 2018.
 17. Исаков А. Л., Ткачук А. К. Классификация и расчет набивных свай // ФТПРПИ. — 2001. — № 6. — С. 46–52.
 18. Сагомоян А. Я. Проникание. — М.: МГУ, 1974. — 300 с.
 19. Ас. СССР 1058647. Самоходное грунтозаборное устройство / А. Д. Костылев, В. А. Григоращенко и др. // Опубл. в БИ. — 1983. — № 45.
 20. Маметьев Л. Е., Дрозденко Ю. В., Любимов О. В. Обоснование транспортирующей способности горизонтального шнекового бурового става // ГИАБ. Перспективы развития горно-транспортного оборудования. — 2011. — Отд. вып. 5. — С. 22–25.
 21. Заглядов П. В. Совершенствование конструкции грунторазмывочного устройства для удаления керна при бестраншейной прокладке коммуникаций // Химия. Экология. Урбанистика. — 2018. — Т 1. — С. 383–385.
 22. Кондратенко А. С., Тимонин В. В., Абирова А. А., Госманов М. К., Есенов Б. У., Жаркенов Е. Б. Технология безопасного сооружения бестраншейных горизонтально-наклонных скважин // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 1. — С. 40–44.
 23. Danilov B. B., Kondratenko A. S., Smolyanitskiy B. N., and Smolensev A. S. Improvement of pipe pushing method, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 3. — P. 478–483.

Поступила в редакцию 03/VI 2019
После доработки 02/VII 2019
Принята к публикации 03/VII 2019