

УДК 624.132.3

*В.А. Пенчук, д.т.н.; В.Н. Гусаков, к.ф.-м.н.;
В.Н. Супонев, к.т.н.; С.М. Вивчар, асп.;
С.П. Балесный, асп.*

ТОЧНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ ПРОКОЛА ГРУНТА

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы влияния жесткости штанг и узлов их соединения на траекторию движения прокальвающей головки. Представлены экспериментальные данные исследования жесткости штанг установки для прокола грунта. Предложены математические модели траектории движения прокальвающей головки.

Ключевые слова: бестраншейные технологии, жесткость штанги, математическая модель, прокальвающая головка, управляемый прокол.

Актуальность работы

Методы бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций находят самое широкое применение во всех странах мира. В силу своей простоты конструкции и технологии применения создания скважины в грунте, — метод прокола особо популя-

рен. Главным недостатком метода традиционного прокола является недостаточная точность траектории движения в грунте прокальвающей головки.

Анализ публикаций

Общие вопросы прокола грунта детально исследованы в работах [1; 2; 3], и в работах [4; 5] предложены конструкции прокальвающих накопечников, которые обеспечивают, при определенных условиях, управление траекторией их движения. Однако в указанных работах отсутствуют рекомендации по учету влияния на траекторию движения прокальвающей головки жесткости штанг и узлов их соединения.

Целью данной работы является разработка математической модели процесса и оценка управления траекторией движения прокальвающей головки с учетом жесткости штанг.

Основной материал

Системный анализ существующих установок прокола грунта позволил их обобщенные технические параметры представить в виде табл. 1.

Как видно из данных табл. 1 наиболее часто прокальвающий став набирается из штанг длиной $L_{шт}=800$ мм и диаметром $D_{шт}=52$ мм.

Табл. 1. Основные параметры прокальвающих установок

№ п/п	Наименование параметра	Единицы измерения	Тип установки			
			УПГ-1	МК-Т6-08	УУП ГФ 40	МП-250
1	Наружный диаметр штанги	мм	52	57	45	63,5
2	Длина	м		0,84	1,0	0,540
3	Количество штанг в комплекте	шт	67	40	50	50
4	Диаметр расширителей в комплексе	мм	108, 133, 159, 219	108, 159, 219, 273	80, 125, 190, 235, 275, 315	108; 159; 219; 273
5	Длина прокальваемой скважины, до	м	50	50	100	25
6	Усилие на штоке гидроцилиндра:					
	при проколе	кН	246	250	360	250
	при расширении	кН	184	250	360	100
7	Скорость прокола	м/мин	2	0,5	2	2
8	Масса установки	т	0,5	0,782	1,020	0,123
9	Масса полного комплекса	т	1,215		1,94	0,54

Табл. 2. Замеры прогибоболкающих штанг

G, кг	X, м	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,5
$G_1=0$ кг	$Y_p, мм$	255,25	252,5	247,75	243,5	240,50	235,50	229,25	220,20	219,75	209,70	203,1
$G_2=16$ кг	$Y_p, мм$	254,40	249,5	243,0	236,4	230,25	221,75	213,50	202,50	195,50	171,0	164,1
$G_3=24$ кг	$Y_p, мм$	252,20	247,50	240,50	232,2	225,50	215,00	204,30	192,50	184,25	163,50	144,3
$G_4=40$ кг	$Y_p, мм$	251,50	243,50	235,00	225,0	213,10	206,10	184,50	168,50	156,00	132,00	102,0

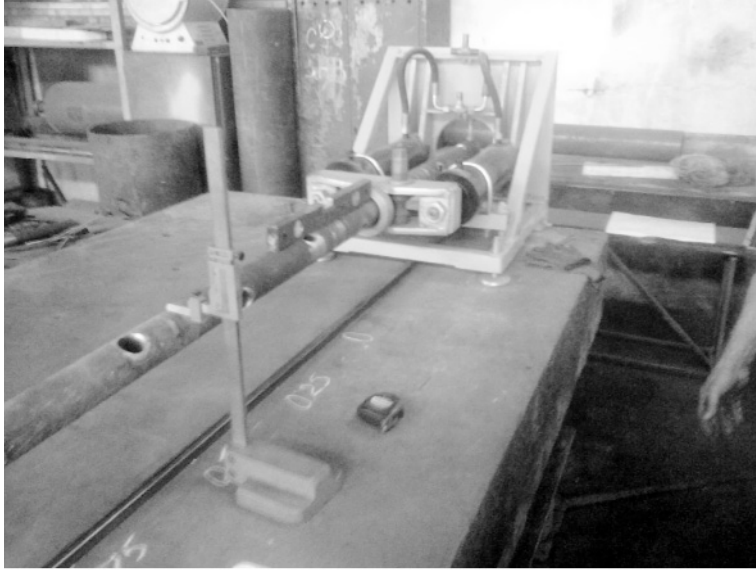


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Для установления жесткости штанг и става из набора количества штанг был разработан специальный стенд (Рис. 1).

Результаты исследований жесткости става штанг различной длины и при различных нагрузках представлены в табл. 2. Анализ результатов исследований показал, что первоначально прогиб штанг пропорционален возрастанию их нагружения, и затем прогиб их замедляется, что вполне согласовывается с теорией прогиба одиночных и составных стержней [6].

Размеры одной штанги: $L_{шт} = 500$ мм, $D_{вн.} = 57$ мм, $D_{нар.} = 63$ мм, вес — 5,76 кг.

При проходке скважин проколом грунта, даже при вращающемся наконечнике, возможно отклонение последнего от заданного направления, это обусловлено неоднократностью плотности грунта, а также деформацией става.

В работе предлагается управление снарядом за счет выбора головки снаряда специфической фор-

мы, позволяющей при отсутствии вращения головной части снаряда возвратиться в точку, лежащую на оси нужного направления прокола. Головка снаряда выбрана в виде сечения цилиндра плоскостью наклоненной под углом к оси.

Для управления проколом в этом случае, необходимо закрепить подвижную часть головки снаряда скошенной плоскостью головки в направлении отклонения снаряда от оси прокола так, чтобы силы сопротивления грунта возвращали головку снаряда в исходное направление (Рис. 2).

Проведем математическое моделирование процесса перемещения головки снаряда в направлении перпендикулярном оси прокола. Процесс прокола грунта не является непрерывным. По технологии процесса прокола грунта необходима приостановка прокола для последовательного наращивания секций става. Таким образом, процесс прокола грунта является дискретным процессом, состоящим из n -непрерывных участков прохождения грунта, равных длине штанги. Для построения математической модели перемещения головки снаряда на каждом из непрерывных участков сделаем следующие допущения:

- вся масса перемещающихся секций става сосредоточена в головном снаряде бурового става;
- уплотнение грунта скважины производится только лобовой частью головки снаряда;
- весь став является одномерным упругим стержнем, имеющим на каждом из n -участков става постоянную жесткость $c_i (i=1, \dots, n)$.

С учетом вышесказанного, для определения величины перемещения на каждом из непрерывных участков проходки, будем исходить из возможности применения второго закона Ньютона.

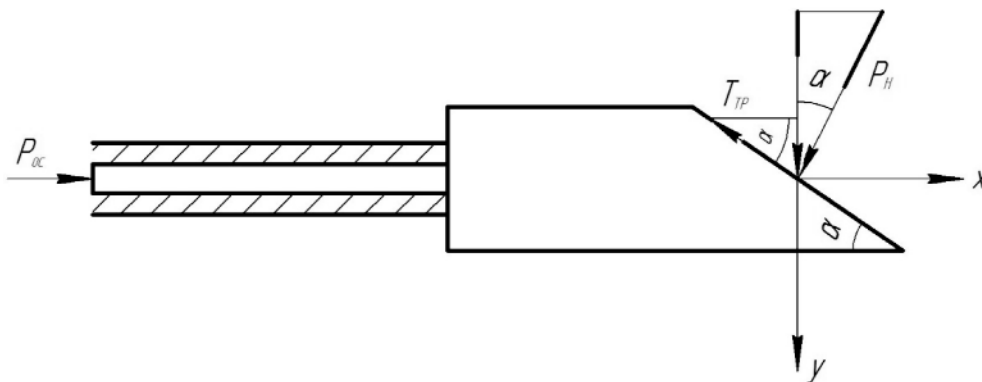


Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих на рабочую головку со скошенной поверхностью

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_H - F_{TP} - F_{yn}, \quad (1)$$

где — F_H сила нормального давления,
 — F_{TP} сила трения,
 — F_{yn} сила сопротивления изгибу става.

Далее полагаем, что сила трения пропорциональна скорости перемещения головки става в нормальном направлении, а сила сопротивления изгибу пропорциональна перемещению головки става с коэффициентами пропорциональности сопротивления k и c_i ($i=1, 2, \dots, n$) соответственно. С учетом сказанного, уравнение движения на каждом из l -участков непрерывного движения можно представить как:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \cdot \cos \alpha - k \frac{dy}{dt} \cdot \sin \alpha - c_i y, \quad (2)$$

где: $P_H = 3,6 \cdot 0,2 \cdot 10^5$ Мпа;

S — площадь сечения головки става;

c_i — жесткость секций става.

Введем обозначения

$$w = \frac{\cos \alpha}{m}, \quad \gamma = \frac{k \sin \alpha}{m}, \quad \delta = \frac{c_i}{m}.$$

Тогда получим

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + \delta \cdot y = w P_H, \quad (3)$$

На первом участке будем полагать

$$y|_{t=0} = 0; \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0,$$

тогда решение уравнения (2) будет иметь вид

$$y = \frac{w}{\delta} P_H \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t} + 1 \right), \quad (4)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - \delta}, \quad \lambda_2 = -\frac{\gamma}{2} - \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - \delta}$$

— корни характеристического уравнения $\lambda^2 + \gamma \lambda + \delta = 0$.

На основе разработанной математической модели была проведена серия численных расчетов.

Значения коэффициентов c_i были взяты из экспериментальных данных полученных в лаборато-

рии ООО "НПП Газтехника" (Табл.1). После обработки экспериментальных данных установлено, что коэффициент жесткости данного става может быть принят равным $c_i = 16 \cdot 10^3 / 9,4$ кгс/м. Коэффициент k , на основании численного эксперимента, был выбран равным $5,36 \cdot 10^5$ (кг/сек). Расчеты были проведены для углов $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$, при времени перемещения рабочего органа $t = 15$ с.

В результате численного анализа получены следующие результаты:

Для угла $\alpha = \pi/6$ перемещение $y_1 = 3,3$ см; для угла $\alpha = \pi/4$ $y_1 = 1,95$ см, для угла $\alpha = \pi/3$, $y_1 = 1,24$ см.

Полученные численные значения корректировки траектории движения прокалывающей головки позволяют утверждать, что угол скоса плоскости α существенно влияет на вертикальные или горизонтальные смещения головки (направление корректировки траектории зависит от пространственного расположения скошенной поверхности). Наибольший эффект при $\alpha = \pi/6$.

После первой корректировки траектории движения прокалывающей головки (на длине одной штанги) возникает необходимость ее продолжения после наращивания очередной штанги. На этом этапе необходимо вычислить величину смещения головки снаряда уже с учетом наращивания очередной секции става. Для этого должна быть рассмотрена следующая краевая задача

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + \delta y = w P_H, \quad y|_{t=0} = y_1, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0, \quad (5)$$

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$y = \frac{w}{\delta} P_H \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t} \right) + y_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right), \quad (6)$$

Расчеты по формуле (5) дают следующие результаты:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 + 3,16 \text{ см} = 3,3 \text{ см} + 3,16 \text{ см} = 6,46 \text{ см, для } \alpha = \pi/6; \\ y_2 &= y_1 + 1,89 \text{ см} = 1,95 \text{ см} + 1,89 \text{ см} = 3,84 \text{ см, для } \alpha = \pi/4; \\ y_2 &= y_1 + 1,2 \text{ см} = 1,24 \text{ см} + 1,2 \text{ см} = 2,44 \text{ см, для } \alpha = \pi/3. \end{aligned} \quad (7)$$

Принимая значения y_2 за начальные условия, можно вычислить значения y на следующем участке прокола. Все результаты были получены при

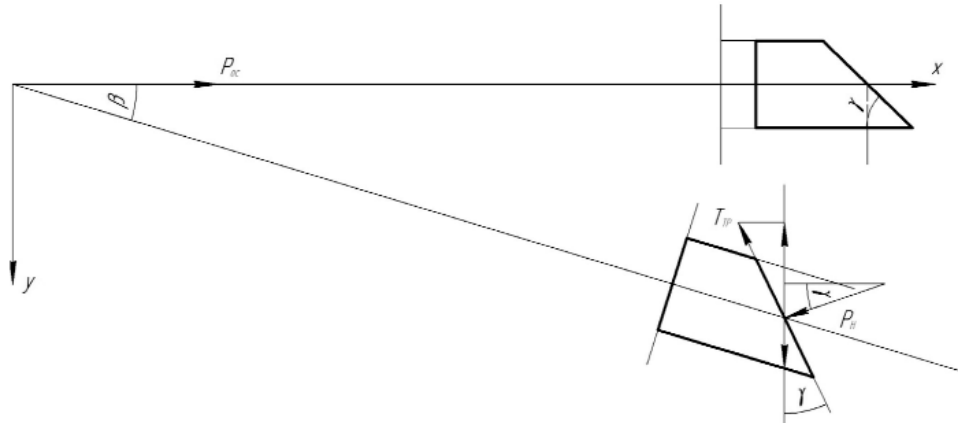


Рис. 3. Схема управления траекторией движения прокальвающей головки

малых значениях вертикального перемещения головки става.

В процессе прокола лобовая часть головки снаряда изменяет свою ориентацию в пространстве (рис. 3), с учетом принятых обозначений уравнение движения прокальвающей головки запишем в следующем виде

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \cdot \sin \gamma - k \frac{dy}{dt} \cdot \cos \gamma - c_i y$$

$$\gamma = \alpha - \beta;$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta, \quad (8)$$

Для малых значений угла $\beta \cos \beta \approx 1; \sin \beta \approx y/l$.

Тогда

$$\sin(\alpha - \beta) \approx \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \frac{y}{l} \quad \text{и} \quad \cos(\alpha - \beta) \approx \cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{y}{l}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \left(\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \frac{y}{l} \right) - k \frac{dy}{dt} \left(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{y}{l} \right) - c_i y$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \sin \alpha - \frac{P_H \cos \alpha}{l} y - k \frac{dy}{dt} \cos \alpha - \frac{k \sin \alpha}{l} y \frac{dy}{dt} - c_i y \quad (8)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \frac{\sin \alpha}{m} - \frac{P_H \cos \alpha}{lm} y - \frac{k \cos \alpha}{m} \frac{dy}{dt} - \frac{k \sin \alpha}{lm} y \frac{dy}{dt} - c_i y$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = P_H \frac{\sin \alpha}{m} - \left(P_H \frac{\cos \alpha}{lm} + c_i \right) y - \frac{k \cos \alpha}{m} \frac{dy}{dt} - \frac{k \sin \alpha}{lm} y \frac{dy}{dt}$$

Введем обозначения

$$w = \frac{\sin \alpha}{m}; \quad \delta = P_H \frac{\cos \alpha}{lm} + c_i;$$

$$\gamma = \frac{k \cos \alpha}{m}; \rho = \frac{k \sin \alpha}{em}.$$

С учетом принятых обозначений запишем

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = wP_H - \delta y - \gamma \frac{dy}{dt} - \rho y \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

Решение этого нелинейного уравнения при начальных условиях $y|_{t=0}=0$; $dy/dt|_{t=0}=0$ позволяет получить значения смещений головки для последующих корректировок траектории движения.

Выводы:

1. Применение прокальвающих головок со скошенной поверхностью целесообразно только в установках, которые обеспечивают вращение става.

2. Угол скоса лобовой поверхности прокальвающей головки имеет значительное влияние на ее отклонение от траектории движения, для установок с управляемым проколом угол скоса поверхности целесообразно принимать равным $\alpha = \pi/6$.

3. Предложенные математические модели процессов корректировки траектории движения прокальвающей головки позволяют оперативно оценивать возможные отклонения рабочего органа от заданного направления.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сунев В.Н. Бестраншейные технологии прокладки распределительных инженерных коммуникаций / В.Н. Сунев, Н.Д. Каслин, В.И. Алексин // *Научный вестник строительства*. — 2008. — №499. — С. 213–217.

2. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / С.В. Кравец, Н.Д. Каслин, В.К. Руднев, В.Н. Сунев. — Харьков: ООО "Фавор", 2008. — 256 с.

3. Григорьев А.С. Обоснование выбора параметров продавливающих установок в зависимости от

длины проходки / А.С. Григорьев // *Сб. научных трудов ст-ов, магистров МГГУ, М.- 2004. — Выпуск 4. — С. 133–136.*

4. Ромакин Н.Е., Малкова Н.В. Параметры рабочего инструмента для статического прокола грунта / Н.Е.Ромакин, Н.В. Малкова // *Строительные и дорожные машины*. — 2007. — № 11. — С. 31–33.

5. Гусев И.В. Применение управляемого прокола грунта при бестраншейной прокладке труб / И.В. Гусев, Ф.Л. Чубаров // *Потенциал современной науки*. — 2014. — № 2. — С. 30–33.

6. Земсков В.М. Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола / В.М.Земсков, А.В. Суздаков // Тула: ТулГУ. Известия ТулГУ. Серия Подъемно-транспортные машины и оборудование. — 2005. — Вып.6. — С. 35–38.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто питання впливу жорсткості штанг і вузлів їх з'єднання на траєкторію руху проколюючої головки. Представлені експериментальні дані дослідження жорсткості штаг установки для проколу ґрунту. Запропоновано математичні моделі траєкторії руху проколюючої головки.

Ключові слова: бестраншейні технології, жорсткість штанги, математична модель, проколююча головка, керований прокол.

ANNOTATION

The influence of the rigidity of the rods and their connections to the trajectory of the thrust boring head has been considered. Experimental analysis data of therods' rigidity of the thrust boring plant has been presented. Mathematical models of the trajectory of the thrust boring head have been proposed.

Key words: trenchless technologies, rod rigidity, mathematical model, thrust boring head, steerable thrust boring.