

ЗЕМЛЕРОЙНАЯ МАШИНА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И УДАЛЕНИЯ ГРУНТА ИЗ-ПОД ТРУБОПРОВОДА

EARTHMOVING MACHINE FOR EXCAVATION AND SOIL REMOVAL FROM UNDER THE PIPELINE.

Кандидат технических наук, профессор Мусийко В., Кандидат технических наук, профессор Гончар М.
Национальный транспортный университет – Киев, Украина
E-mail: musvd@i.ua, gmo48@ukr.net

Abstract: *Performability and failure-free operation of the line pipe of the trunk oil and gas pipelines significantly depend on the timely overhaul repair. The set of high productivity earthmoving machines for the excavations during overhaul repair of the trunk pipelines has been created. The soil excavation and removal from under the pipeline is being performed by the specialized earthmoving machine with milling rotary implement that is equipped with additional power-driven intensifier of the soil unloading. The optimal design layout of the machine and the rational modes of the soil excavation under the pipeline ensure the safe performance of the excavation works under the active pipeline with the diameter of 1420 mm and the speed of up to 150 lin m/h.*

KEYWORDS: *PERFORMABILITY, PIPELINE, OVERHAUL REPAIR, EARTHMOVING MACHINE, INTENSIFIER, UNLOAD, SOIL*

1. Введение

Работоспособность и безаварийная эксплуатация линейной части магистральных нефте- и газопроводов существенно зависит от своевременного выполнения их капитального ремонта. Учитывая тот факт, что в Украине на сегодняшний день в эксплуатации находятся около 40 тыс. км. магистральных газопроводов и порядка 4,5 тыс. км. магистральных нефтепроводов, более половины протяженности которых отработали свой гарантийный срок эксплуатации, вопрос обеспечения быстрого, качественного и, самое главное, безопасного выполнения капитального ремонта трубопроводов должен быть решен [1].

Широкомасштабные проекты по восстановлению трубопроводов осуществляются в США фирмами «Chell» и «Natural Gas Pipeline Company of America», в Саудовской Аравии. «Saudi Arabian Oil Company», в Канаде – «Interprovincial Pipe line Company», в России – РАО «Газпром», АК «Транснефть». В Украине работы подобного рода выполняют структурные подразделения НАК «Нафтогаз Украины» или их подрядчики.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

Применяемая до настоящего времени технология выполнения капитального ремонта, когда вскрытие трубопроводов производится бульдозером и одноковшовыми экскаваторами с последующим подъемом трубы с грунтового ложа, малопродуктивная и влечет за собой возникновение аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями.

В условиях возросших требований к вопросам экологии, безопасности выполнения ремонтных работ представляется целесообразной разработка технологии и технологических средств высокой производительности, позволяющих вести ремонт трубопроводов без подъема трубы, установки временных промежуточных опор или поддержки трубопровода трубоукладчиками [2-4].

В настоящее время основными методами капитального ремонта магистральных трубопроводов в мире с заменой изоляционного покрытия есть ремонты с использованием метода сплошной переизоляции трубы в траншее, или путем подъема ее трубоукладчиками на бровку траншеи, или же метод выборочного ремонта, когда ремонтируется без подъема из траншеи локальный участок трубопровода.

Объемы ремонтных работ на магистральных нефте- и газопроводах, которые необходимо выполнить для сохранения в эксплуатации трубопроводных магистралей в Украине можно выполнить по данным наших расчетов путем увеличения в 6...7 раз количества технологических бригад, выполняющих капитальный ремонт трубопровода или повышения в 6...7 раз темпов выполнения капитального ремонта трубопроводов. Это возможно за счет оснащения ремонтных подразделений новой специальной высокопроизводительной техникой и изменения

технологии выполнения ремонтных работ. Более перспективным представляется путь создания новых специализированных машин высокой производительности [3].

Для решения указанной задачи служит созданный с нашим участием комплекс машин повышенной производительности [4, 5], который состоит из последовательно работающих машин:

- послышной разработки грунта (МПРГ);
- вскрытия трубопровода (МВТ);
- подкапывающей роторной (МПР);
- для засыпки и подбивки грунта под трубопроводом (МП).

К недостаткам землеройных машин комплекса следует отнести:

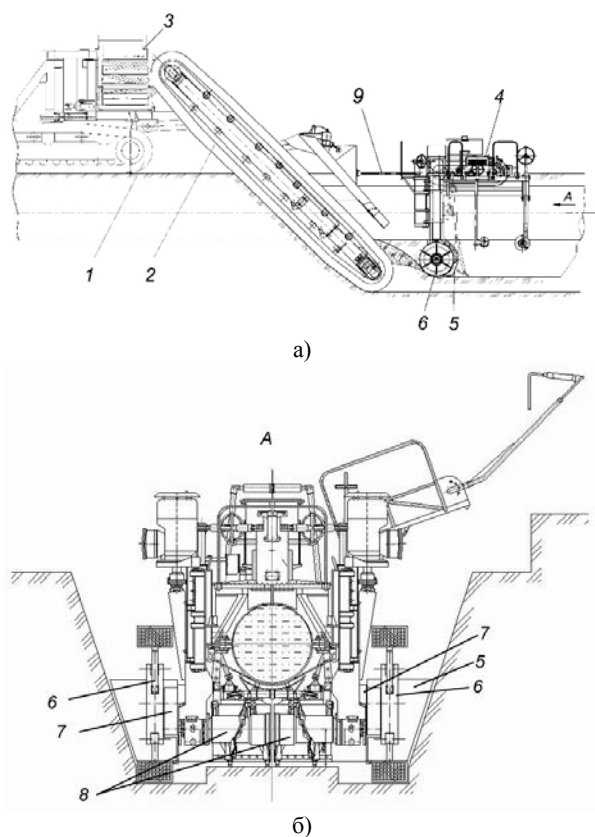
- не возможность контроля расстояния между работающими одновременно машинами, особенно МВТ и МПР, как фактора определяющего напряженно-деформированное состояние (НДС) ремонтируемой трубы;
- сложность, а иногда и невозможность разработки под трубопроводом вязких липких, переувлажненных глинистых грунтов;
- необходимость сооружения специальных приямков вдоль трубопровода для размещения грунта, который разрабатывается МПР под трубопроводом, что приводит к завышенной глубине разрабатываемых траншей, увеличению объема грунта, разрабатываемого вокруг трубопровода, возможного подтопления трубопровода грунтовыми водами.

3. Решение рассматриваемой проблемы

Ликвидировать, или в значительной степени нивелировать указанные недостатки, можно на наш взгляд, путем доработки конструкций машин вскрытия трубопроводов и, главное, подкапывающей роторной, а также кардинального изменения организации их работы путем создания тандема машин для вскрытия (МВТ) и подкапывания (МПР) трубопровода [6, 7], фиг. 1. Для этого МВТ оснащается эвакуатором грунта конвейерного типа, а МПР - дополнительно - отвальными закрылками, которые перекрывают свободное пространство откопанных по сторонам трубопровода машиной МВТ траншей и работают как плужные очистители. Положение очистителей соответствует профилю разработанных вдоль трубопровода траншей. Машина оснащается также интенсификаторами перемещения грунта разработанного под трубой в направлении рабочего оборудования машины вскрытия трубопровода. Они выполняют функцию промежуточных эвакуаторов разработанного машиной МПР грунта под трубой к рабочему оборудованию машины вскрытия трубопровода и последующего его перемещения за пределы траншей при помощи ленточного конвейера МВТ.

Необходимое постоянное расстояние между машинами МВТ и МПР устанавливается исходя из условия равенства скоростей перемещения обеих машин, работающих в режиме копания грунта и контролируется установленным на МПР датчиком контроля расстояния между машинами и дополнительной штангой с конечными выключателями. Это обеспечивает

аварийные остановки машин и исключает их столкновение при работе.

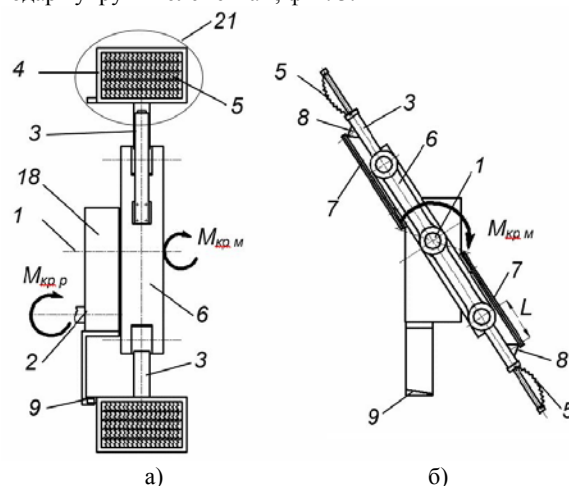


Фиг. 1. Тандем машин вскрытия трубопроводов и подкапывающей роторной.

а – вид сбоку; б – вид сзади; 1 – машина вскрытия трубопровода; 2 – цепной рабочий орган машины МВТ; 3 – эвакуатор грунта машины МВТ; 4 – машина подкапывающая роторная; 5 – отвальные закрылки; 6 – приводные интенсификаторы разгрузки грунта машины МПР; 7 – редукторы привода интенсификаторов; 8 – грунтоработывающие роторные фрезы машины МПР; 9 – штанга контроля расстояния между машинами.

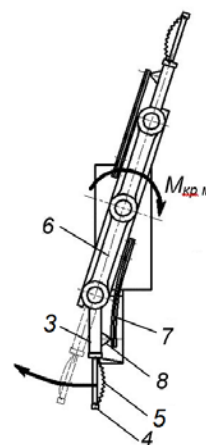
Каждый из приводных интенсификаторов расположен на валу индивидуального промежуточного редуктора, который соединен с валом привода грунтоработывающих фрезерных роторов подкапывающей машины. Интенсификаторы размещены относительно оси роторов таким образом, чтобы способствовать обеспечению забора и эвакуации разработанного грунта с обеих сторон трубы на рабочие органы машины вскрытия трубопровода. Каждый интенсификатор, фиг. 2, выполнен в виде метателя, грунтотбрасывающие элементы (ковши) которого имеют гибкие днища, представляющее собой ряды переплетенных между собой тяговых цепей, закрепленных в рамках, а они в свою очередь, жестко крепятся на рычагах. Экспериментально установлено, что таким образом грунт дополнительно разрыхляется, и гарантировано отделяется от поверхности даже когда имеет высокую липкость. Рычаги шарнирно крепятся к корпусу редуктора с ограничением поворотного движения, по крайней мере в одну сторону. При этом ограничения поворота рычагов в направлении движения грунтотбрасывающих рычагов осуществляется с помощью упругих элементов, что также является частью механизма взвода метателя. Механизм взвода выполнен таким образом, чтобы рычаги перед взаимодействием установленных на них грунтотбрасывающих ковшей с грунтом отклонялись в сторону противоположную направлению вращения метателя, сжимая упругие элементы, а при выходе из зоны действия механизма взвода

грунтоотбрасывающих ковшей с грунтом освобождали энергию благодаря упругим элементам, фиг. 3.



Фиг. 2. Конструктивная схема интенсификатора разгрузки грунта машины подкапывающей роторной (МПР).

а – вид сзади машины; б – вид сбоку; 1 – ведомый вал промежуточного редуктора привода интенсификатора; 2 – вал привода грунтоработывающего ротора; 3 – рычаг грунтотбрасывающего звена; 4 – рамка ковша; 5 – гибкое днище; 6 – центральный вращающийся ротор; 7 – упругие элементы; 8 – упор; 9 – рычаг взвода упругого элемента (устройство взвода упругих элементов в рабочее положение в целом на фигуре не показано).

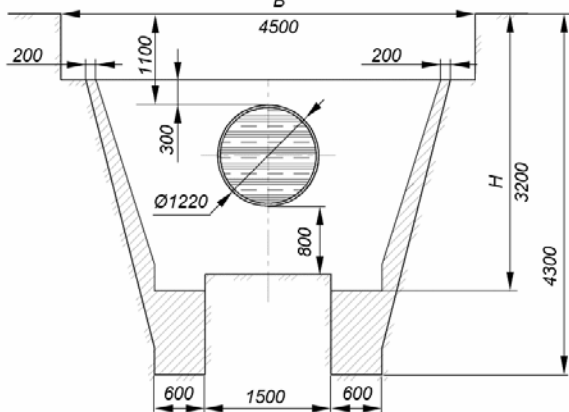


Фиг. 3. Интенсификатор в рабочем положении со взведенным упругим элементом.

Указанное исполнение приводных интенсификаторов позволяет изменить принцип взаимодействия грунтотбрасывающих звеньев с грунтом. В данном случае грунтотбрасывающие звенья не скользят по грунту, а захватывают его как ковши, которые медленно заполняются, а затем стремительно и на значительное расстояние отбрасывают порции грунта благодаря распрямлению сжатых пружин.

В результате грунт, который разрабатывается машиной подкапывающей роторной под трубой, подается на рабочие органы машины вскрытия трубопровода и механизмами этой машины транспортируется в отвал. Это исключает копание глубоких приямков по бокам трубопровода для размещения в них разработанного подкапывающей машиной грунта. Это уменьшает общий объем необходимых земляных работ и соответственно их энергоемкость, особенно в сложных условиях (высоком уровне грунтовых вод, наличии подстилающих твердых пород и т.п.), фиг. 4. Отсутствие глубоких приямков улучшает способность грунта (под трубопроводом) для опирания на него трубопровода, исключает неконтролируемое и чрезмерное проседание грунта под трубопроводом и, соответственно, исключает избыточные

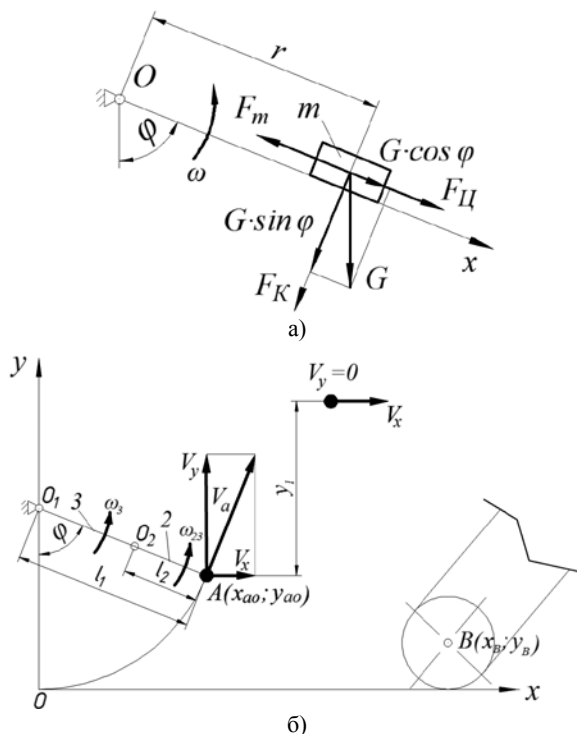
деформации трубопровода как во время ремонтных работ, так и потом во время эксплуатации.



Фиг. 4. Сравнение профилей разрабатываемых выемок под трубой при работе машины подкапывающей роторной с интенсификаторами и без них.

В ходе исследований определены исходная угловая координата и требуемая скорость выброса грунта из ковша интенсификатора при которых разработанный под трубой и перемещаемый интенсификатором грунт имеет траекторию перемещения, которая обеспечивает его попадание на рабочий орган машины вскрытия трубопровода.

При рассмотрении вопроса принято, что грунтотбрасывающий рабочий орган интенсификатора располагается в системе координат XOY, фиг. 5. Ротор интенсификатора вращается с постоянной угловой скоростью ω . В положении ротора, определяемом углом φ на частицу грунта массой m которая находится на расстоянии r от оси вращения ротора в ковше интенсификатора, действуют силы: веса грунта $G = m \cdot g$, центробежная сила инерции $F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 \cdot r$, кориолисова сила инерции $F_{\text{к}} = 2 \cdot m \cdot V \cdot \omega$ (V – скорость движения частицы грунта относительно несущей поверхности ротора) и сила трения $F_m = (m \cdot g \cdot \sin \varphi + 2 \cdot m \cdot V \cdot \omega) \cdot f$, (f – коэффициент внешнего трения грунта).



Фиг. 5. Расчетные схемы движения частицы грунта. а – во взаимодействии с рабочим органом; б – вне рабочего органа.

Дифференциальное уравнение движения частицы грунта по рабочей поверхности ковша:

$$(1) \quad m\ddot{x} = F_{\text{ц}} + G \cdot \cos \varphi - F_m$$

После подстановки значений сил в уравнение (1) получено:

$$(2) \quad \ddot{x} + a\dot{x} + b = 0,$$

где $\dot{x} = V$; $a = 2 \cdot \omega \cdot f$; $b = -(\omega^2 \cdot r + g \cdot \cos \varphi - g \cdot f \cdot \sin \varphi)$.

После ввода новой функции $z(t) = \dot{x}$ в уравнение (2) оно становится дифференциальным уравнением первого порядка:

$$(3) \quad \dot{z} + a z = -b.$$

Решив соответствующее однородное уравнение $\dot{z} + a z = 0$, после разделения переменных и интегрирования находим:

$$(4) \quad z = \pm C_1 \cdot e^{-at} = C \cdot e^{-at}.$$

Общее решение уравнения (4) представим как $z = C(t) \cdot e^{-at}$, после дифференцирования уравнение (4) имеет вид:

$$(5) \quad \dot{z} = \dot{C}(t) \cdot e^{-at} - a \cdot C(t) \cdot e^{-at}$$

После подстановки значений (4) и (5) в уравнение (3) и интегрирования полученного выражения получено

$$C(t) = -\frac{b}{a} e^{at} + C_2.$$

Общее решение уравнения (4) в таком случае имеет вид:

$$(6) \quad z = C(t) \cdot e^{-at} = \left(-\frac{b}{a} e^{at} + C_2 \right) \cdot e^{-at} = -\frac{b}{a} + C_2 \cdot e^{-at}.$$

При $t = 0$ скорость перемещения частицы грунта определяется

$$\text{из выражения } z = \frac{dx}{dt} = \frac{b}{a} + C_2 e^{-at} = 0, \text{ откуда } C_2 = -\frac{b}{a}.$$

Уравнение (6) приобретает вид:

$$(7) \quad \frac{dx}{dt} = \frac{b}{a} e^{-at} - \frac{b}{a} = \frac{b}{a} (e^{-at} - 1).$$

Решаем уравнение (7) относительно параметра перемещения x :

$$dx = \frac{b}{a} (e^{-at} - 1) dt.$$

После интегрирования получаем:

$$(8) \quad x = \frac{b}{a} \int (e^{-at} - 1) dt = \frac{b}{a} \left(\int e^{-at} dt - \int dt - \int dt \right) = -\frac{b}{a^2} e^{-at} - \frac{b}{a} t + C.$$

При $t = 0, x = 0$ определяем: $C = \frac{b}{a^2}.$

Из зависимостей (7) и (8), с учетом обозначений в выражении (2) получены формулы для определения скорости V и перемещения S частицы грунта по поверхности ковша ротора в направлении оси ox :

$$(9) \quad V = \frac{g \cdot f \cdot \sin \varphi - \omega^2 \cdot r - g \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \omega \cdot f \cdot e^{2 \cdot \omega \cdot f \cdot t}} (1 - e^{2 \cdot \omega \cdot f \cdot t});$$

$$(10) \quad S = \frac{g \cdot f \cdot \sin \varphi - \omega^2 \cdot r - g \cdot \cos \varphi}{4 \cdot \omega^2 \cdot f^2} \left(\frac{e^{2 \cdot \omega \cdot f \cdot t} - 1}{e^{2 \cdot \omega \cdot f \cdot t}} - 2 \cdot \omega \cdot f \cdot t \right).$$

Абсолютная скорость V_a частицы грунта, которая находится на рабочей поверхности ковша:

$$(11) \quad \bar{V}_a = \bar{V}_n + \bar{V}_e,$$

где V_n – переносная скорость; V_e – относительная скорость.

Величина переносной скорости определяется согласно выражению

$$(12) \quad V_n = \omega_3 \cdot \ell_1$$

где ω_3 – угловая скорость ротора интенсификатора; ℓ_1 – текущее значение расстояния от элементарной частицы грунта в ковше, до оси вращения 3, фиг. 5.

По условию сдвига элементарной частицы относительно несущей поверхности ковша переносная скорость частицы определяется по формуле (9).

Относительная скорость V_e – это скорость частицы грунта, которая возникает вследствие углового перемещения рычага 2 относительно рычага 3. Модуль вектора относительной скорости V_e определяется согласно выражению:

$$(13) \quad V_e = \omega_{23} \cdot \ell_2,$$

где ω_{23} – угловая скорость рычага 2 при его вращении относительно рычага 3, которая изменяется в пределах от $\omega_{23} = 0$ в момент начала распрямления пружины до $\omega_{23} = \omega_{23max}$ – в конце распрямления.

ℓ_2 – радиус установки ковша интенсификатора относительно оси вращения O_1 рычага 2.

В момент окончания углового движения рычага 2 относительно вращающегося рычага 3 ротора скорость частицы грунта больше скорости ковша в котором эта частица находится ($V_a > V_n$). В начале свободного полета частица находится в точке A_0 (X_{AO}, Y_{AO}).

В этот момент направления векторов скоростей V_g и V_n совпадают, а величину абсолютной скорости представляем проекциями на координатные оси:

$$(14) \quad \vec{V}_a = \vec{V}_x + \vec{V}_y.$$

Вертикальная составляющая абсолютной скорости $V_y = V_a \sin \varphi$, обеспечивает перемещение частицы грунта вдоль оси OY на

$$\text{расстояние } Y_1 = \frac{V_y^2}{2g}, \quad (g - \text{ускорение свободного падения; } \varphi -$$

угол, по достижению которого заканчивается угловое движение рычага 2 относительно рычага 3 под действием пружины).

Перемещаясь в режиме свободного полета частица грунта должна попасть в зону работы цепного скребкового рабочего органа машины МВТ, фиг. 1, с помощью которого переместится к разгрузочному конвейеру и дальше в отвал.

В системе координат XOY уравнение оси рабочего органа:

$$(15) \quad y = (x - x_b) \operatorname{tg} \alpha + y_b,$$

где x_b, y_b – координаты оси вращения натяжной звездочки цепи рабочего органа машины МВТ;

α – угол наклона рабочего органа.

Координаты полета частицы грунта в функции времени:

$$(16) \quad x_A = x_{AO} + V_a \cdot t \cdot \cos \varphi; \quad y_A = y_{AO} + V_a \cdot t \cdot \sin \varphi - \frac{g \cdot t^2}{2}.$$

Из уравнения (16) время t определяется следующим образом:

$$(17) \quad t = \frac{x_A - x_{AO}}{V_a \cdot \cos \varphi}.$$

Из решения уравнения (16) относительно t получаем:

$$(18) \quad t_{1,2} = \frac{V_a \cdot \sin \varphi \pm \sqrt{V_a^2 \cdot \sin^2 \varphi - 2 \cdot g \cdot (y_A - y_{AO})}}{g}.$$

Поскольку время движения частицы грунта в режиме свободного полета находится в интервале значений

$$0 \leq t \leq t_{\max} = \frac{V_a \cdot \sin \varphi}{g},$$

решением уравнения (16) является значение t , рассчитанное согласно формуле (18) со знаком минус перед корнем.

Приравняв значения t , определенные согласно выражений (16) и (18) получили уравнение траектории движения частицы грунта после ее отрыва от ковша интенсификатора:

$$(19) \quad y_A = \frac{2g \cdot y_{AO} \cdot V_a^2 \cdot \cos^2 \varphi + 2V_a^2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (x_A - x_{AO})^2 \cdot g^2}{2g \cdot V_a^2 \cdot \cos^2 \varphi}.$$

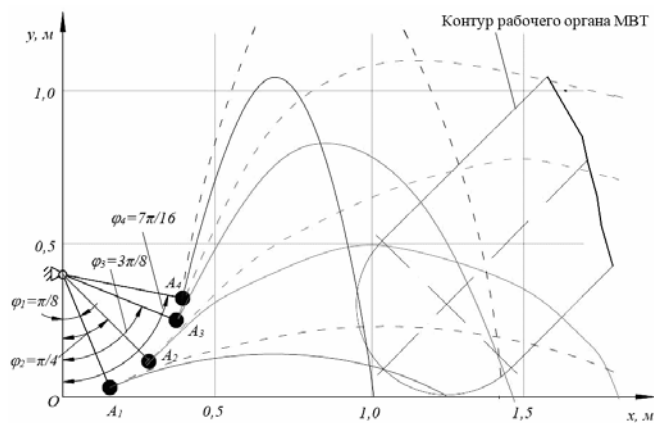
Результаты.

На фиг. 6 в системе координат XOY показаны траектории движения частицы грунта в режиме свободного полета для различных значений угла поворота φ .

Вид траекторий подтверждает обеспечение возможности перегрузки разработанной машиной подкапывающей роторной трубы под трубой на рабочий орган машины вскрытия трубопровода и последующую его эвакуацию в отвал.

Заключение

1. Землеройная машина для разработки и удаления грунта из-под трубопровода, оснащенная дополнительными приводными интенсификаторами разгрузки грунта, способна эффективно разрабатывать под трубопроводом в том числе и переувлажненные, липкие грунты.



Фиг. 6. Траектории движения элементарной частицы грунта при разгрузке ковша интенсификатора.

2. При создании интенсификаторов разгрузки грунта для землеройных роторных подкапывающих машин рациональными являются следующие величины конструктивных и кинематических параметров: $\ell_1 = 0,4$ м; $\ell_2 = 0,2$ м; $\omega_{23} = 4$ рад/с.

3. Рациональными значениями угла φ взвода рычага интенсификатора следует считать:

- при $\omega_3 = 7,54$ рад/с (72 об/мин) – $\varphi = \pi/4 \dots 3\pi/8$;

- при $\omega_3 = 10,47$ рад/с (100 об/мин) – $\varphi = \pi/8 \dots 7\pi/16$.

Литература.

1. Василюк В.Н. Основные направления обеспечения надежности эксплуатации магистральных нефтепроводов Украины. - Сборник докладов науч. техн. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта». 2009. – С. 5-8.
2. Мусийко В.Д. Безопасность и ресурсосбережение при выполнении капитального ремонта магистрального трубопроводного транспорта. Современные информационные и инновационные технологии на транспорте: материалы второй международной научно-технической конференции. 2010. – Т. 1. – С. 175-179. (Мусийко В.Д., Кузьминцев Н.П., Баланин В.Х.)
3. Василенко С.К. Технология и комплекс технических средств для капитального ремонта магистральных нефтепроводов без подъема трубы. - Трубопроводный транспорт нефти. №2. 1994. С. 26-28. (Василенко С.К., Быков А.В. Мусийко В.Д.)
4. Василенко С.К. Скоростной капитальный ремонт магистральных трубопроводов. Нефть и газ. № 9. 2004. С. 42-43. (Василенко С.К., Стецькив М.В., Мусийко В.Д.)
5. Мусийко В.Д. Опережая мировые разработки на 10-15 лет. Нефтегазовая вертикаль. №12. 2002. С. 18-21.
6. Дмитриченко Н.Ф. ТанDEM машин для раскрытия та подкапывания трубопровода. – Управление проектами, системный анализ и логистика. № 12. 2013. С. 42-50. (Дмитриченко Н.Ф., Билякович М.О., Мусийко В.Д., Кузьминцев Н.П.)
7. Патент 94563 Украина. ТанDEM машин для раскрытия та подкапывания трубопровода или другого подобного подземного объекта. Заявл. 05.10.2010. Опубл. 10.05.2011, Бюл. № 6. (Дмитриченко Н.Ф., Мусийко В.Д., Билякович М.О., Кузьминцев Н.П., Баланин В.Х., Савенок В.И.)
8. Патент 93459 Украина. Подкапываемое оборудование для разработки и эвакуации грунта из-под трубопровода. Заявл. 22.12.2009. Опубл. 10.02.2011. Бюл. №3. (Мусийко В.Д., Карпенко О.М.)