

В.И. ПЕТРОЧЕНКО, кандидат технических наук
Институт водных проблем и мелиорации НААН

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СПОСОБОМ «СТЕНА В ГРУНТЕ»

Предложена новая конструкция разделительного элемента для строительства способом «стена в грунте» дренажных и противофильтрационных сооружений, состоящая из отдельных, соединенных между собой секций, и приведены методические основы выбора и расчета ее основных параметров.

Ключевые слова: способ «стена в грунте», противофильтрационная завеса, траншея, твердеющий заполнитель траншеи, разделительный элемент.

Запропоновано нову конструкцію розділового елемента для будівництва способом «стіна в ґрунті» дренажних і протифільтраційних споруд, що складається з окремих, з'єднаних між собою секцій, і наведено методичні основи вибору і розрахунку її основних параметрів.

Ключові слова: спосіб «стіна в ґрунті», протифільтраційна завеса, траншея, заповнювач траншеї, розділовий елемент.

A new design of the separating element method for building "a wall in the ground" and the cutoff drainage structures, consisting of separate, interconnected sections, and provides methodological principles of choice and calculation of its basic parameters.

Key words: a way to "slurry wall", of anti-veil trench, filler trench, separating element.

Проблема и ее актуальность. В большинстве технологических процессов строительства подземных линейно-протяженных гидротехнических сооружений, таких как противофильтрационная завеса, дренажная стенка, глубокий горизонтальный трубчатый дренаж, выполняемых способом «стена в грунте», предусмотрено временное разделение полости траншеи на отдельные захватки с помощью вертикально устанавливаемых разделительных элементов [1-3], которые еще называют разделителями захваток [4] или ограждающими шаблонами [5].

Обычно разделительные элементы изготавливают в виде полых жестких трубчатых стержней диаметром, соответствующим ширине траншеи, и длиной, несколько превышающей глубину траншеи. Для предотвращения перемещения разделительных элементов в траншею силами гидростатического давления, их

выполняют с противоугонными приспособлениями (боковыми ножами, донными штырями) или же овального поперечного сечения [6]. После опускания в траншею разделительного элемента овального поперечного сечения и поворота его вокруг продольной оси он оказывает распирающее боковое усилие на обе стенки траншеи и надежно фиксируется в траншее. Но при этом установлено, что основным недостатком процесса разделения захваток траншеи с помощью разделительных элементов известных трубчатых конструкций является большая сила сопротивления извлечению их из траншеи, которая появляется в результате схватывания или уплотнения бетонных, грунтовых или грунтоцементных твердеющих заполнителей траншеи.

Для устранения этого недостатка по техническому решению [6] предложено покрывать поверхность разделительных элементов консистентной смазкой, а затем погружать их в траншею в специальных чехлах из полимерной пленки. Однако, это существенно усложняет технологический процесс и повышает стоимость строительства подземного сооружения. Кроме того, использование разделительных элементов моноблочной трубчатой конструкции особенно неэффективно при строительстве сооружений глубиной от 18 до 50 м, когда возникает необходимость не только приложения очень больших усилий при извлечении разделительных элементов, но и подъема их на большую высоту.

Цель исследования – обосновать эффективную конструкцию разделительного элемента для строительства линейно-протяженных подземных гидротехнических сооружений способом «стена в грунте» и разработать методические основы расчета ее основных параметров.

Результаты исследования. Исследования проводились в связи с возникшей проблемой разделения захваток при строительстве в 1994-1995 годах противофильтрационной глиноцементной завесы вдоль отвала хвостохранилища Центрального ГОКа г. Кривого Рога. Завеса сооружалась на глубину 30 м с помощью проходческого агрегата СВД-500Р и предназначалась для защиты Карачуновского водохранилища от загрязнения сильноминерализованными водами, фильтрующими со стороны хвостохранилища.

Строительство завесы выполняло СУ-625 ОАО «Укргидро-спецфундаментстрой». Для выполнения монтажных работ использовался гусеничный кран МКГ-25БР, имеющий максимальную грузоподъемность 250 кН при высоте подъема крюка 17,5м. Первоначально для разделения траншеи на захватки, в одной из которых производился забой грунта агрегатом СВД-500Р, а полость другой заполнялась глиноцементной пастой, использовался разделительный элемент традиционной моноблочной трубчатой конструкции. Из-за недостаточно плотного прилегания жесткого разделительного элемента к неровным поверхностям стенок траншеи, технологический процесс нарушался – глиноцементная паста перетекала в зону забоя грунта. Кроме того, уже на следующий день после установки разделительного элемента и заполнения

траншеи глиноцементной пастой потребовалось усилие начального сдвига разделительного элемента, значительно превышающее 250 кН, что не позволяло использовать для этих целей кран МКГ-25БР без дополнительного полиспада.

Для устранения указанных недостатков строительства противофильтрационной завесы было предложено новое конструктивное решение разделительного элемента (разделителя захваток), состоящего из отдельных секций [7].

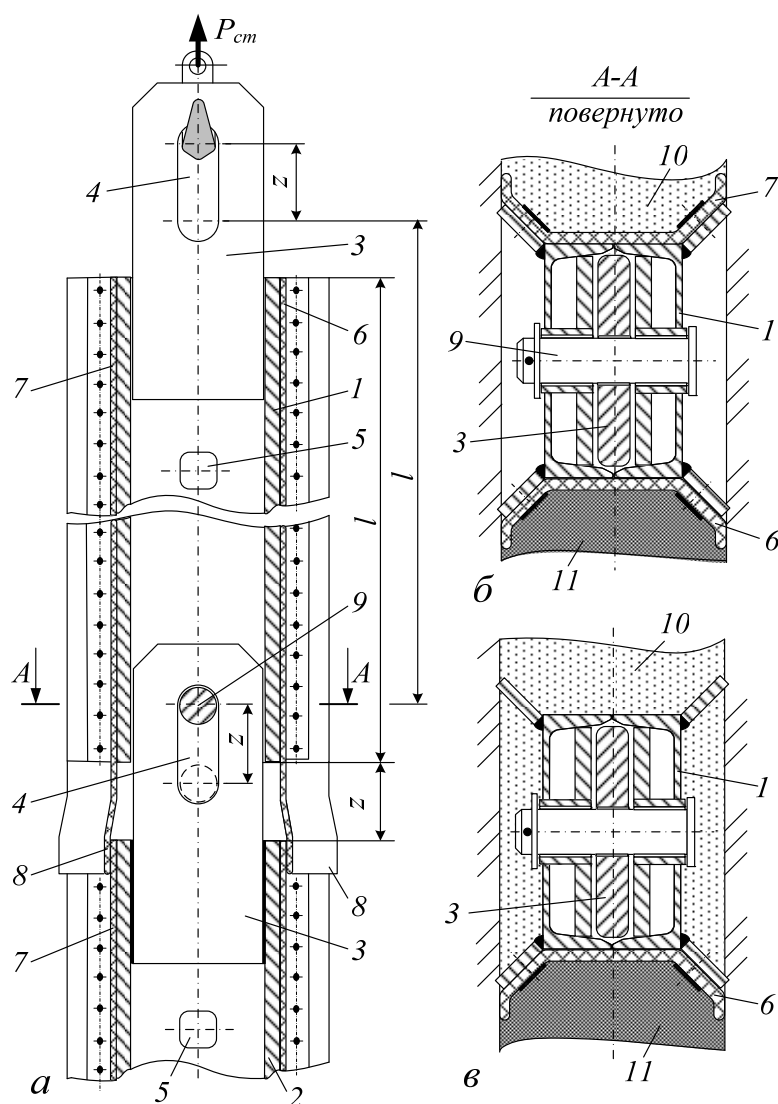


Рис. 1. Конструктивная схема секционного разделителя захваток траншеи: *а* – вид сбоку секционного разделителя; *б* – вид по А-А секции разделителя, выполненной с передним и задним лобовыми клапанами; *в* – вид по А-А секции разделителя, выполненной с задним лобовым клапаном; 1 – вышерасположенная секция; 2 – нижерасположенная секция; 3 – проушина; 4 – прорезь; 5 – монтажное отверстие; 6 – задний лобовой клапан; 7 – передний лобовой клапан; 8 – юбка лобового клапана; 9 – соединительный палец; 10 – глинистый раствор; 11 – твердеющий наполнитель

Секционный разделитель захваток новой конструкции (рис.1) был изготовлен на ремонтно-механическом заводе ОАО «Укргидро-спецфундаментстрой» и использовался при строительстве завесы.

Секционный разделитель собирают из отдельных секций в процессе его опускания в траншею и разбирают в процессе извлечения из траншеи. В верхних концах секций разделителя предусмотрены монтажные отверстия 5, через которые пропускают опорный стержень для временной фиксации разделителя на бровке траншеи в период его сборки и разборки.

При сборке разделителя каждую вышерасположенную секцию последовательно соединяют с нижерасположенной секцией с помощью пальцев 9, совмещая соединительные отверстия круглого сечения, просверленные в нижних концах вышерасположенных секций, с прорезями свободного скольжения 4, выполненными в проушинах 3 нижерасположенных секций. Прорези 4 имеют фиксированный продольный параметр z , соответствующий величине свободного хода пальца 9, за счет чего обеспечивается возможность свободного относительного перемещения в вертикальном направлении двух соединенных между собой смежных секций разделителя.

Для обеспечения герметичного разделения полости траншеи с глинистым раствором 10, в которой производится забой грунта, и полости траншеи, в которую укладывают твердеющий заполнитель (глиноцементную пасту) 11, лобовые поверхности секций разделителя снабжены задними 6 и передними 7 резиноканевыми лобовыми клапанами (рис.1б). Для строительства противофльтрационной завесы вдоль отвала хвостохранилища Центрального ГОКа г. Кривого Рога был изготовлен и использовался разделитель, секции которого имели только задние лобовые клапаны 6 (рис. 1в), ограничивающие перемещение в траншее свежееуложенного твердеющего заполнителя. Разделитель был изготовлен из пяти секций. Длина каждой секции разделителя составляла 6 м. Благодаря использованию прорезей 4, обеспечивающих каждому пальцу 9 величину свободного хода $z = 60$ мм, достигался положительный эффект последовательного отрыва секций разделителя от затвердевшего заполнителя, что обеспечивало существенное снижение силы подъема разделителя, а также возможность эффективного применения крана МКГ-25БР для выполнения этой операции.

В основу разработки методики обоснования и расчета параметров секционного разделителя положено исследование силы R_m сопротивления извлечению из траншеи разделителя моноблочной конструкции и силы R_c сопротивления извлечению из траншеи секционного разделителя. В зависимости от высоты h подъема базовой точки ($A \rightarrow A_1 \rightarrow A_2$) разделителя, находящейся в начальный момент подъема на уровне бровки траншеи (точка А на рис. 2б), характер изменения сил R_m и R_c представлен графиками 2, 3 и 4. Сила сопротивления R_m характеризуется графиком 2. Она складывается из

$$R_M^h = 10^{-3} \left(f_p \Pi_M^{3n} \frac{g \rho h^2}{2} + M_M g \right), \quad (2)$$

где R_M^{max} – максимальное значение силы R_M , которое соответствует моменту отрыва моноблочного разделителя от твердеющего заполнителя, кН; R_M^h – сила сопротивления извлечению моноблочного разделителя после его отрыва от твердеющего заполнителя, зависящая от высоты подъема разделителя h , кН; τ_p – расчетная величина адгезии на сдвиг между поверхностью разделителя и материалом твердеющего заполнителя, Па; Π_M^{3n} – часть периметра поперечного сечения моноблочного разделителя, которая контактирует с твердеющим заполнителем траншеи, м; H_{mp} – глубина траншеи, м; f_p – расчетный коэффициент трения между поверхностью разделителя и окружающей его массой постепенно густеющего глинистого раствора;

g – ускорение свободного падения, м/с²; Π_M – полный периметр поперечного сечения моноблочного разделителя, м; ρ – средняя плотность массива грунта кг/м³; M_M – масса моноблочного разделителя, кг.

Поскольку сила тяжести разделителя составляет незначительную часть силы R_M^{max} , в дальнейших расчетах можно принять:

$$M_M = q_M L \approx q_M H_{mp}, \quad (3)$$

где L – длина разделителя, м; q_M – масса одного погонного метра моноблочного разделителя, кг/м.

Максимальная величина силы сопротивления R_M^{max} извлечению моноблочного разделителя наблюдается не в самый начальный момент его подъема, а при достижении некоторой величины упругой деформации χ_M , которая соответствует перемещению верхней точки разделителя из положения A в положение A_M (рис.2а). Деформация χ_M рассчитывается на основе закона Гука:

$$\begin{aligned} \chi_M &= \int_0^{H_{mp}} \frac{\sigma_h h}{E} dh = \frac{1}{EF_M} \int_0^{H_{mp}} (\tau_p \Pi_M^{3n} h + f_p \Pi_M g \rho h^2 + q_M g h) dh = \\ &= \frac{1}{EF_M} \left(\frac{\tau_p \Pi_M^{3n} H_{mp}^2}{2} + \frac{f_p \Pi_M g \rho H_{mp}^3}{3} + \frac{q_M g H_{mp}^2}{2} \right), \quad (4) \end{aligned}$$

где σ_h – напряжение от продольного растяжения разделителя в сечении h , Па; E – модуль упругости стали, Па; F_M – площадь поперечного сечения тела моноблочного разделителя, м².

Условие прочности разделителя на разрыв, которое может быть использовано при выборе толщины стенки трубчатого моноблочного разделителя, запишется в таком виде:

$$[F_M] = R_M^{max} / [\sigma], \quad (5)$$

где $[F_m]$ – предельно допустимая площадь поперечного сечения тела разделителя, м²; $[\sigma]$ – предельно допустимое напряжение стальных конструкций на растяжение, Па.

Подставив значение R_m^{max} [Па] из (1) в (5), а затем значение $[F_m]$ из формулы (5) в формулу (4) ($F_m = [F_m]$), получим формулу расчета максимально допустимого удлинения $[\chi_m]$ моноблочного разделителя при допустимом напряжении растяжения $[\sigma]$:

$$[\chi_m] = \frac{[\sigma] \left(\frac{\tau_p \Pi_m^{3n} H_{mp}^2}{2} + \frac{f_p \Pi_m g \rho H_{mp}^3}{3} + \frac{q_m g H_{mp}^2}{2} \right)}{E \left(\tau_p \Pi_m^{3n} H_{mp} + f_p \Pi_m \frac{g \rho H_{mp}^2}{2} + q_m H_{mp} g \right)}. \quad (6)$$

С учетом допущения (3), формулу (6) можно упростить:

$$[\chi_m] = \frac{[\sigma] (3\tau_p \Pi_m^{3n} H_{mp} + 2f_p \Pi_m g \rho H_{mp}^2 + 3q_m g H_{mp})}{3E (2\tau_p \Pi_m^{3n} + f_p \Pi_m g \rho H_{mp} + 2q_m g)}. \quad (7)$$

Сила сопротивления R_c подъему секционного разделителя, состоящего, например, из четырех секций, представлена на рис. 2 двумя сопряженными графиками 3 и 4. График 3, имеющий пилообразную форму, характеризует силу R_c в процессе перемещения базовой точки разделителя из положения A в положение A_1^0 (рис. 2) на расстояние:

$$A_1^0 - A = Z + \chi_c^{max} = (n-1)z + \chi_c^{max}, \quad (8)$$

где Z – общая величина свободного удлинения секционного разделителя за счет прорезей в соединительных проушинах, м; n – количество секций разделителя; χ_c^{max} – максимальная величина упругой деформации тела секционного разделителя, соответствующая моменту отрыва от затвердевшего заполнителя самой нижней секции, м.

Экстремальные значения R_c^i силы R_c , которые на графике 3 (рис. 2) соответствуют моментам последовательного отрыва каждой i -й ($i = \overline{1, n}$) секции разделителя от затвердевшего заполнителя, определяются [кН] по формуле:

$$R_c^i = 10^{-3} \left(\tau_p \Pi_c^{3n} (l+z) + f_p \Pi_c \frac{g \rho (l+z)^2 i^2}{2} + q_c g (l+z) i \right), \quad (9)$$

где Π_c^{3n} – часть периметра поперечного сечения секционного разделителя, которая контактирует с твердеющим заполнителем траншеи, м; Π_c – полный периметр поперечного сечения секционного разделителя, м; q_c – масса одного погонного метра секционного разделителя, кг/м.

Ввиду того, что $z \ll l$, принимается: $l + z \approx l$. Тогда максимальное значение силы извлечения из траншеи секционного разделителя R_c^{max} соответствует моменту отрыва от твердеющего заполнителя самой нижней n -й секции при перемещении его базовой точки из положения A в положение A_1^0 :

$$R_c^{\max} = R_c^n = 10^{-3} \left(\tau_p \Pi_c^{3n} l + f_p \Pi_c \frac{g \rho l^2 n^2}{2} + q_c g l n \right). \quad (10)$$

Максимальную величину продольной деформации $\chi_c^{\max} = \chi_c^n$ секционного разделителя, которая создается действием силы R_c^n , следует определять таким же путем, как и величину деформации χ_m моноблочного разделителя (4). Однако, в связи с тем, что в момент действия максимальной силы R_c^n молекулярное адгезионное сцепление с твердеющим наполнителем будет иметь только самая нижняя секция разделителя длиной l , то χ_c^n определится на основе закона Гука в виде суммы интегралов:

$$\begin{aligned} \chi_c^n &= \frac{1}{EF_c} \left(\int_0^l \tau_p \Pi_c^{3n} h dh + \int_l^{nl} \tau_p \Pi_c^{3n} l dh \right) + \frac{1}{EF_c} \int_0^{nl} (f_p \Pi_c g \rho h^2 + q_c g h) dh = \\ &= \frac{1}{EF_c} \left(\frac{\tau_p \Pi_c^{3n} l^2 (2n-1)}{2} + \frac{f_p \Pi_c g \rho n^3 l^3}{3} + \frac{q_c g n^2 l^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Максимально допустимое удлинение $[\chi_c^n]$ ступенчатого разделителя определяется из (11) на основе логического подхода, который использовался при определении $[\chi_m]$ (7):

$$[\chi_c^n] = \frac{[\sigma] (3\tau_p \Pi_c^{3n} l (2n-1) + 2f_p \Pi_c g \rho n^3 l^2 + 3q_c g n^2 l)}{3E (2\tau_p \Pi_c^{3n} + f_p \Pi_c g \rho l n^2 + 2q_c g n)}. \quad (12)$$

Удлинение $[\chi_c^n]$ учитывается при расчете параметра z на основе зависимостей:

$$u = K_1 [\chi_c^n]; \quad (13) \quad z \geq K_2 u; \quad (14) \quad z \geq K_1 K_2 [\chi_c^n], \quad (15)$$

где u – перемещение базовой точки от начала (A_1) до окончания (A_1^u) действия сил адгезии между наполнителем и поверхностью самой нижней секции разделителя, м; K_1 – коэффициент, учитывающий соотношение между перемещением u базовой точки в условиях действия сил адгезии и упругим удлинением $[\chi_c^n]$ ($K_1 = 2 \dots 3$); K_2 – коэффициент запаса ($K_2 = 3 \dots 5$).

Таким образом, согласно условию (15), величина z , должна в 6...15 раз превышать максимально допустимую величину упругого удлинения $[\chi_c^n]$.

Для определения максимальной величины силы извлечения секционного разделителя R_c^n по формуле (10) и удлинения $[\chi_c^n]$ по формуле (12) необходимо иметь экспериментальные значения параметров τ_p и f_p , которые зависят от свойств наполнителя траншеи и глинистого раствора, а также от времени нахождения разделителя в траншее. Параметры τ_p и f_p являются значениями функций $\tau(t)$ и $f(t)$ от аргумента t в точке t_p (рис. 3), где t_p – расчетное значение промежутка времени нахождения разделителя в траншее. Обычно t_p принимается в интервале от 8 до 72 часов (72 часа – максимальное значение времени t при совпадении выходных и праздничных дней).

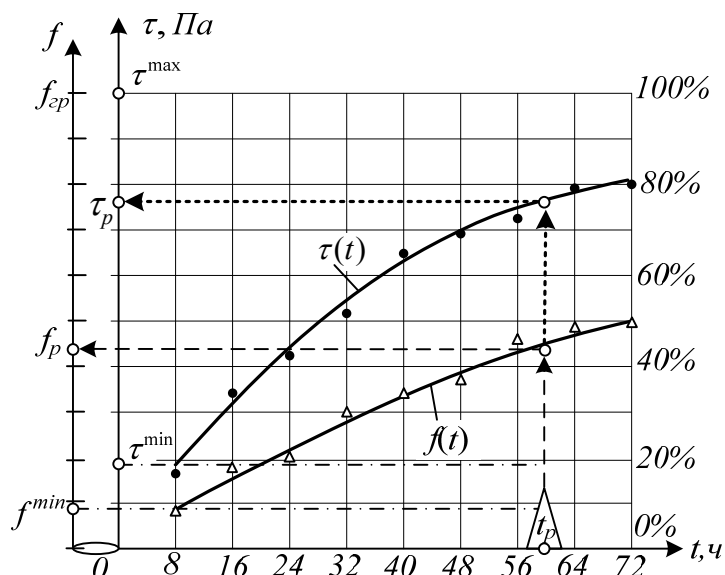


Рис. 3. Графическое определение расчетной величины адгезии τ_p и расчетной величины коэффициента трения f_p на основе экспериментальных данных

Графики функций $\tau(t)$ и $f(t)$ (рис.3) строят на основе результатов экспериментальных исследований, выполняемых на специальной установке, конструкция которой показана на рис.4.

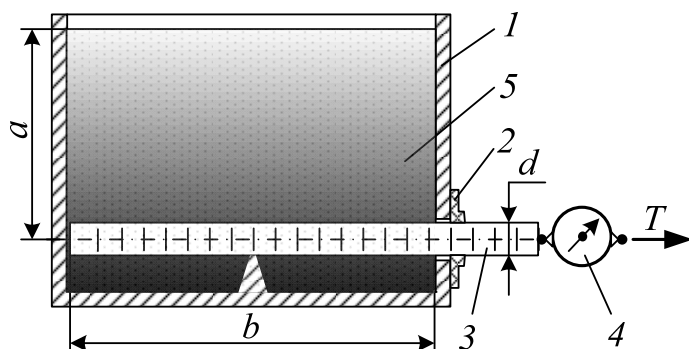


Рис. 4. Схема установки для определения экспериментальных значений функций $\tau(t)$ и $f(t)$:

1 – корпус; 2 – резиновое уплотнение; 3 – подвижный стержень; 4 – динамометр; 5 – твердеющий наполнитель траншеи или густеющий глинистый раствор

При определении экспериментальных значений функции $\tau(t)$ полость корпуса 1 заполняют свежеприготовленным наполнителем 5, затем через фиксированный промежуток времени сдвигают испытуемый стальной или обрешиненный стержень 3 усилием T . Значение τ_i [Па] по истечению времени t_i определяют по формуле:

$$\tau_i = \frac{T_i}{\pi d b}, \quad (16)$$

где T_i – усилие начального сдвига стержня, Н; d и b – диаметр и длина стержня, м ($d = 0,02 \dots 0,05$ м; $b = 0,2 \dots 0,6$ м).

Значения τ_i могут быть определены также на сдвиговом адгезиметре «Константа СА-2».

При определении экспериментальных значений функции $f(t)$ полость корпуса 1 заполняют глинистым раствором 5, а затем через фиксированный промежуток времени t_j перемещают испытуемый стержень 3 усилием T_j . Значение f_j , определяют по формуле:

$$f_j = \frac{T_j}{g \rho \pi d b}. \quad (17)$$

Расчетное значение коэффициента трения f_p на отрезке времени от 8 до 72 часов осаждения осадка в глинистом растворе весьма малое ($0,003 < f_p < 0,02$). Впоследствии f_p значительно возрастает. В реальных условиях строительства сооружения по истечению года и более коэффициент трения f_p достигает значения коэффициента трения $f_{cp} \approx 0,5$ между поверхностью разделителя и грунтом уплотненной структуры.

При строительстве заглубленного сооружения с фиксированными параметрами траншеи, необходимо использовать секционный разделитель, у которого усилие извлечения из траншеи R_c^n , рассчитанное по формуле (10), не превышало бы максимального усилия крана $P_{кр}$ по технологическим критериям, а число его секций $[n]$ по экономическим критериям было бы минимальным. Для этого необходимо построить график функции R_c^n от аргумента n (рис. 5), используя формулу (10), затем построить график времени монтажа разделителя t_c^n от параметра n , используя формулу:

$$t_c^n = \left(t_0 + \frac{\frac{H_{mp} + \Delta H}{v_{нк}} + t_{mp} + \frac{\frac{H_{mp} + \Delta H}{v_{ок}} + t_{мс}}{n} \right) n, \quad (18)$$

где t_0 – суммарное время, необходимое для закрепления секции разделителя на крюке крана и снятия секции с крюка, мин; ΔH –

дополнительная высота подъема секции над поверхностью земли ($\Delta H = 0,5 \dots 1,5$ м); $v_{нк}$ и $v_{ок}$ – скорость подъема и скорость опускания крюка крана, м/мин; t_{mp} – время установки и выравнивания секции разделителя над траншеей, мин; $t_{мс}$ – продолжительность монтажных работ операции соединения двух секций, мин.

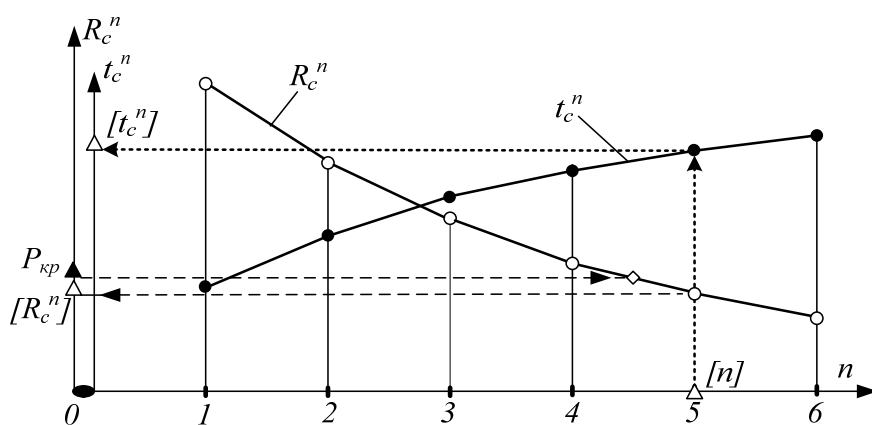


Рис. 5. Определение количества секций разделителя $[n]$ и времени $[t_c^n]$ его установки

После этого из точки $P_{кр}$, соответствующей максимальному усилию подъема на крюке крана, проводят горизонтальную линию до ее пересечения с графиком R_c^n (рис.5). Определяют расчетное количество секций $[n]$, при котором расчетная сила извлечения секционного разделителя $[R_c^n] \leq P_{кр}$. Затем определяют время $[t_c^n]$ установки разделителя.

Выводы

Основным недостатком разделительных элементов моноблочной конструкции, используемых при строительстве подземных линейно-протяженных гидротехнических сооружений способом «стена в грунте», является большая сила сопротивления их извлечения после схватывания в траншее твердеющих заполнителей. Этот недостаток устраняется в конструкциях разделительных элементов, состоящих из отдельных секций, в узловых соединениях которых предусмотрена возможность свободного осевого перемещения каждой секции на фиксированную величину. Основными расчетными параметрами секционных разделительных элементов является сила сопротивления их извлечения из траншеи, величина свободного осевого перемещения секций и количество секций.

Список литературы

1. Черепяный В.М., Литвин В.Т., Злобин Ю.А. Комплексная механизация работ при строительстве противодиффузионной диафрагмы способом «стена в грунте». – «Механизация строительства», 1975, №10. – С10–11.
2. Инструкция по технологии и механизации строительства противодиффузионных диафрагм и монолитных несущих стен методом «стена в грунте». РСН 316-79. – К.: НИИСП, 1980. – 216 с.
3. Бандырский И.К., Чернухин А.М., Галинский, А.М. и др. Грунтопленочная диафрагма в основании плотины хвостохранилища //

Промышленное строительство и инженерные сооружения, 1989. – №1. – С. 10–12.

4. *Загребельный Ю.А., Кожемяко В.С.* Технология строительства грунтопленочной противодиффузионной диафрагмы. – Информационный листок о научно-техническом достижении № 89-045, Запорожский МТЦНТИ, 1989.

5. *Смородинов М.И., Федоров Б.С.* Устройство сооружений и фундаментов способом «стена в грунте». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.

6. *Галинский А.М., Чернухин А.М.* Способ возведения противодиффузионной диафрагмы. – А. с. 1142574 (СССР). Оpubл. в Б.И. 1985, №8.

7. *Петроченко В.І.* Роз'єднувальний пристрій для бетонування траншей. – Патент України 3281. Оpubл. в Бюл. 1994, № 6-1.

Петроченко В.І. Вдосконалення конструкції розділового елемента при будівництві підземних гідротехнічних споруд способом «стіна в ґрунті».