

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСТРАНШЕЙНОЙ УКЛАДКИ ГИБКИХ ДРЕНАЖНЫХ И ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ ЗАЩИТЫ ОТ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ГРУНТОВЫХ ВОД

**А. В. ПЕТРОЧЕНКО**

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры,  
г. Киев, Украина, 03022, e-mail: a\_petr89@ukr.net*

**В. И. ПЕТРОЧЕНКО**

*Институт водных проблем и мелиорации НААН Украины,  
г. Киев, Украина, 03022, e-mail: v\_petr47@ukr.net*

*(Поступила в редакцию 15.10.2020)*

*Воду без преувеличения можно назвать основой жизни на нашей планете. Наземные растения и живые организмы в среднем на 50–75 % состоят из воды. В сельском хозяйстве и экологии можно выделить две диаметрально противоположные проблемы, связанные с водой. Первая проблема – это дефицит воды в маловодных засушливых регионах, где проживает треть населения планеты. Вторая проблема – это постоянный или временный избыток воды в районах, где она оказывает вредное воздействие на жизнедеятельность людей в виде затопления и подтопления сельскохозяйственных земель и застроенных территорий, водной эрозии грунтов, разрушения зданий и сооружений.*

*В статье приведены результаты исследования процесса укладки бестраншейными мелиоративными машинами гибких трубчатых и рулонных материалов при строительстве дренажных и противодиффузионных сооружений защиты от вредного воздействия поверхностных и грунтовых вод. Приведены некоторые варианты конструктивных и технологических решений использования в гидромелиоративном строительстве бестраншейного способа укладки вертикальных противодиффузионных экранов из пленки. Выполнены исследования силы натяжения гибкого элемента при его прохождении через полости рабочих органов бестраншейных машин. Установлены условия прочности гибких трубчатых и рулонных материалов, укладываемых в грунт бестраншейным способом.*

**Ключевые слова:** *вредное воздействие вод, дренажные и водозадерживающие сооружения, гибкий элемент, сила трения.*

*Without exaggeration, water can be called the basis of life on our planet. Land plants and living organisms are, on average, 50–75 % water. In agriculture and ecology, two diametrically opposed water problems can be distinguished. The first problem is water scarcity in dry and arid regions, where one third of the world's population lives. The second problem is a permanent or temporary excess of water in areas where it has a harmful effect on people's livelihoods in the form of flooding and waterlogging of agricultural land and built-up areas, water erosion of soil, destruction of buildings and structures.*

*The article presents results of research into the process of laying flexible tubular and roll materials by trenchless reclamation machines during the construction of drainage and impervious structures to protect against the harmful effects of surface and groundwater. We have presented some variants of constructive and technological solutions for the use in irrigation and drainage construction of a trenchless method of laying vertical impervious screens made of film. We have studied the tensile force of a flexible element during its passage through the cavities of working bodies of trenchless machines. We have established the conditions of strength of flexible tubular and roll materials, laid in the ground by a trenchless method.*

**Key words:** *harmful effects of water, drainage and water retention structures, flexible element, friction force.*

### **Введение**

В работе [1] выделены две основные функционально отличающиеся альтернативы защиты объекта (территории, сооружения) от вредного воздействия вод. По первой альтернативе обеспечивают ускорение движения воды для своевременного ее отвода от объекта, на который она оказывает вредное воздействие. Этого достигают применением открытого и закрытого дренажа. По второй альтернативе обеспечивают замедление скорости и ограничение объема воды, движущейся к объекту, которому вода может оказывать вредное воздействие. Для этого применяют защитные водозадерживающие сооружения (плотины, дамбы, перемычки) с противодиффузионными экранами, завесами, диафрагмами. Учитывая то, что выполнение гидротехнических мероприятий защиты от вредного воздействия вод требует значительных инвестиций, их выбор необходимо осуществлять на основе функционально-стоимостного анализа, согласно которому предпочтение отдают варианту, обеспечивающему максимальный функциональный (защитный) эффект при минимальных затратах. Анализ различных вариантов гидротехнических мероприятий по первой и второй альтернативе защиты от вредного воздействия вод показывает, что среди прочих вариантов наиболее эффективным является вариант применения высокопроизводительного бестраншейного способа строительства как дренажных, так и водозадерживающих (противодиффузионных) защитных сооружений [2–4]. Однако высокая эффективность применения бестраншейного способа может быть достигнута только при условии качественного прохождения без разрывов и повреждений гибких дренажных и противодиффузионных материалов через поло-

сти рабочих органов бестраншейных машин. В связи с этим представляется весьма актуальным исследование ранее недостаточно изученного процесса укладки в грунт гибких дренажных и противофильтрационных материалов бестраншейным способом.

Целью исследования является научно-методическое обоснование параметров процесса укладки гибких дренажных и противофильтрационных материалов рабочими органами бестраншейных машин.

### Основная часть

Изготовление гибких пластмассовых дренажных труб и полимерных гидротехнических пленок началось в 60-х годах прошлого столетия с развитием химической промышленности. Сразу же с появлением пластмассовых дренажных труб нашел применение бестраншейный способ строительства дренажа, отличающийся высокой производительностью [2]. Бестраншейный способ строительства водозадерживающих сооружений из полимерной пленки был предложен и впервые внедрен в практику гидротехнического строительства значительно позже [4, 5]. Было изготовлено два образца укладчика вертикальных пленочных экранов УВПЭ-1,5 (рис. 1а). Один укладчик использовался при строительстве противофильтрационных завес на рисовых чеках в Одесской области (рис. 1б) [5], а второй при строительстве плотины в Черниговской области (рис. 1в) [6].

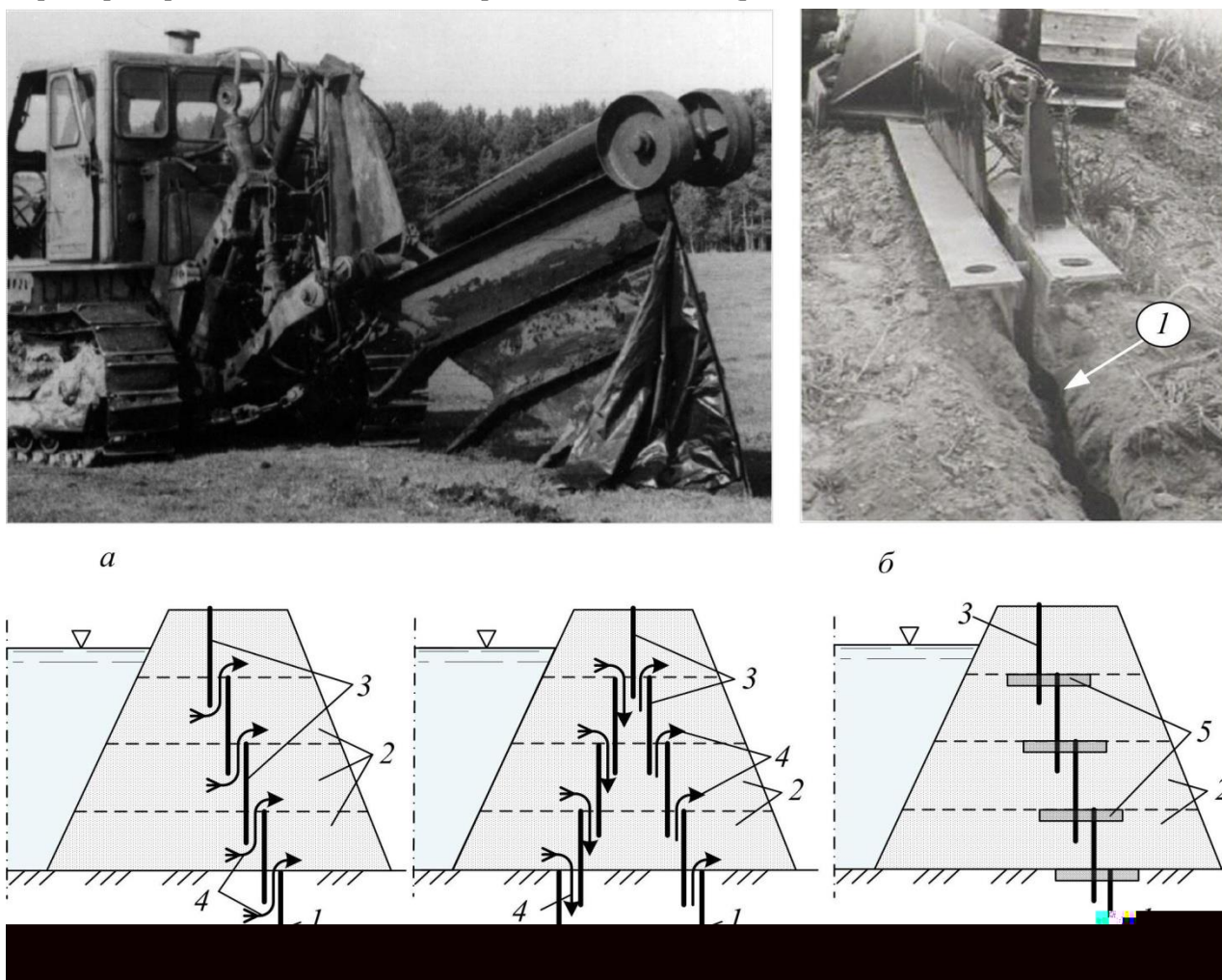


Рис. 1. Бестраншейный способ строительства водозадерживающих сооружений из полимерной пленки: а – укладчик вертикальных пленочных экранов УВПЭ-1,5 [4]; б – укладка противофильтрационной завесы на дамбе обвалования рисового чека [5]; в – дамба с пленочной диафрагмой, построенная ярусным способом [6, 7]; г – дамба с противофильтрационным ядром [8]; д – дамба с усовершенствованной пленочной диафрагмой [9]; 1 – противофильтрационная завеса из пленки; 2 – ярус дамбы; 3 – вертикальный экран из пленки (секция диафрагмы); 4 – ограниченная фильтрация

Структурный анализ технологических циклов бестраншейной укладки в грунт гибких дренажных и противофильтрационных материалов показал, что продолжительность времени установки на рабочий орган бестраншейной машины нового барабана (бухты) с дренажной трубой или нового рулона полимерной пленки, взамен израсходованного, существенно влияет на производительность процесса. Из этого следует, что барабаны с дренажной трубой или рулоны с пленкой необходимо устанавли-

вать на рабочие органы бестраншейных машин с применением быстро разъемных подшипников скольжения, выполненных в виде цапф, опирающихся на вилочные опоры.

Исследование процесса укладки в грунт гибких дренажных и противодиффузионных материалов рабочими органами бестраншейных машин было выполнено в три этапа.

На первом этапе была поставлена задача определения силы натяжения гибкого элемента при его сматывании с барабана или рулона, установленного на вилочной подшипниковой опоре (рис. 2).

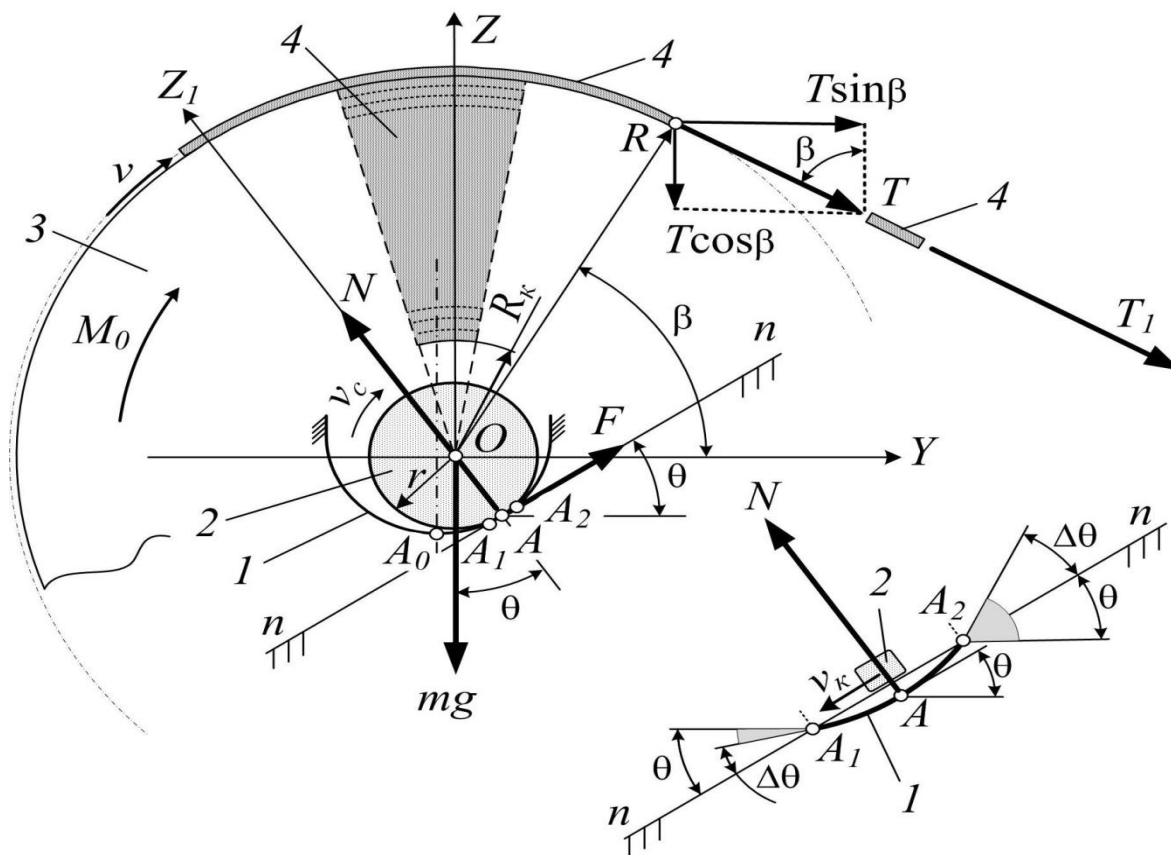


Рис. 2. Схема для определения силы сматывания гибкого элемента с барабана (рулона):

1 – вилочная подшипниковая опора; 2 – цапфа; 3 – барабан; 4 – гибкий элемент, сматываемый с барабана

На вилочной подшипниковой опоре 1 рабочего органа бестраншейной машины с помощью цапфы 2 установлен барабан 3 с гибким элементом 4 (трубчатый или рулонный материал). В состоянии покоя контакт цапфы 2 с опорой 1 устанавливается в точке  $A_0$ , определяющей взаимное расположение трущихся поверхностей в статическом состоянии. В процессе рабочего перемещения бестраншейной машины со скоростью  $v$  с такой же скоростью происходит сматывание с барабана 3 гибкого элемента 4. При вращении барабана 3 контакт цапфы 2 с рабочей поверхностью опоры 1 перемещается из точки  $A_0$  в точку  $A$ , положение которой в динамическом состоянии является устойчивым и характеризуется углом трения  $\theta$  (рис. 2). При вращении барабана исключается произвольное уменьшение угла  $\theta$  на величину  $\Delta\theta$ , при котором контакт трущихся поверхностей переходит из точки  $A$  в точку  $A_1$ , а также увеличение угла  $\theta$  на величину  $\Delta\theta$ , при котором контакт трущихся поверхностей переходит из точки  $A$  в точку  $A_2$ , поскольку это приведет к нарушению равновесия сил, приложенных к барабану. Поэтому в дальнейших расчетах процесс скольжения поверхности цапфы 2 по поверхности опоры 1 с относительной скоростью  $v_c$  можно рассматривать как процесс скольжения с условно равномерной скоростью  $v_c$  цапфы 2 по поверхности плоскости  $mn$ , наклоненной к горизонту под углом  $\theta$ . Для расчета скорости  $v_c$  и угла  $\theta$  используют формулы:

$$v_c = v \frac{r}{R}; \theta = \arctg f \quad (1)$$

где  $v_c$  – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей цапфы 2 и опоры 1, м/с;  $v$  – скорость сматывания гибкого элемента, м/с;  $r$  – радиус цапфы, м;  $R$  – радиус слоя гибкого элемента, сматываемого с барабана, м;  $\theta$  и  $f$  – угол и коэффициент трения скольжения стали о сталь.

Для расчета силы трения в вилочной подшипниковой опоре используют формулу:

$$F = f \cdot N = \operatorname{tg} \theta \cdot N = \operatorname{tg} \operatorname{arctg} f \cdot N, \quad (2)$$

где  $F$  – сила трения скольжения, Н;  $N$  – нормальная к плоскости  $nm$  сила давления в точке  $A$ , Н.

Из условия равновесия моментов сил, действующих на барабан при его вращении без сматывания гибкого элемента, определяют чистый момент силы трения в вилочной подшипниковой опоре:

$$M_0 = F_0 \cdot r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \cdot r = \operatorname{tg} \operatorname{arctg} f \cdot m \cdot g \cdot \cos \operatorname{arctg} f \cdot r = m \cdot g \cdot \sin \operatorname{arctg} f \cdot r, \quad (3)$$

где  $M_0$  – чистый момент сил, необходимый для вращения барабана без сматывания гибкого элемента, Н·м;  $F_0$  – сила трения в вилочной подшипниковой опоре при свободном вращении барабана;  $m$  – масса барабана с гибким элементом, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Формула (3) может быть также использована для расчета момента трения в опорных подшипниках скольжения различных вращающихся валов, испытывающих радиальную нагрузку.

При рабочем сматывании с барабана гибкого элемента силой  $T$ , направленной под углом  $\beta$  к вертикали, имеют условие равновесия моментов сил относительно центра  $O$ :

$$T \cdot R = F \cdot r = f \cdot N \cdot r, \quad \text{Н.} \quad (4)$$

Силу  $N$  определяют из условия равновесия проекций внутренних и внешних сил на ось  $Z_1$ :

$$\sum z_1 = 0; \quad N = m \cdot g \cdot \cos \theta + T \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta + T \cdot \sin \beta \cdot \sin \theta. \quad (5)$$

Подставив значение силы  $N$  из (5) в (4), получают формулу для определения силы натяжения гибкого элемента при движении бестраншейной машины с постоянной скоростью:

$$T = \frac{m \cdot g \cdot \cos \theta}{\frac{R}{f \cdot r} - \cos \beta \cdot \cos \theta - \sin \beta \cdot \sin \theta}, \quad \text{Н.} \quad (6)$$

В начале движения бестраншейной машины вращение барабана и сматывание с него гибкого элемента происходит с ускорением. С учетом углового ускорения вращения барабана силу натяжения  $T_0$  сматываемого с барабана гибкого элемента определяют по формуле:

$$T_0 \cdot R = T \cdot R + (J_m + J_0) \varepsilon, \quad \text{Н,} \quad (7)$$

где  $J_m$  – момент инерции собранного в барабан или рулон гибкого элемента, кг·м<sup>2</sup>;  $J_0$  – момент инерции пустого барабана, кг·м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – угловое ускорение вращения барабана, с<sup>-2</sup>.

Подставив в (7) значение силы  $T$ , рассчитанное по формуле (6), а также значение момента инерции  $J_m$  гибкого элемента, имеющего форму толстостенного полого цилиндра, силу  $T_0$  натяжения гибкого элемента с учетом ускорения вращения барабана определяют по формуле:

$$T_0 = \frac{m \cdot g \cdot \cos \theta}{\frac{R}{f \cdot r} - \cos \beta \cdot \cos \theta - \sin \beta \cdot \sin \theta} + \left[ \frac{\pi \cdot \rho \cdot b}{2R} (R^4 - R_k^4) + \frac{J_0}{R} \right] \varepsilon, \quad (8)$$

где  $b$  – ширина барабана с дренажной трубой, собранной в форме полого толстостенного цилиндра или ширина рулона с пленкой, м;  $\rho$  – объемная плотность материала гибкого элемента, кг/м<sup>3</sup>.

Факторный анализ показывает, что рассчитываемая по формуле (8) сила  $T_0$  имеет наибольшую величину в начальный момент укладки гибкого элемента, когда варьируемые параметры  $m$ ,  $R$ ,  $\varepsilon$  имеют наибольшие значения  $m_n$ ,  $R_n$ ,  $\varepsilon_n$ . Перейдя от углового ускорения  $\varepsilon_n$  барабана к соответствующему ему линейному ускорению  $a_n$  машины в начале ее движения, получают формулу расчета силы  $T_1$  максимального натяжения гибкого элемента, сматываемого с барабана:

$$T_1 = \frac{m_n \cdot g \cdot \cos \operatorname{arctg} f}{\frac{R_n}{f \cdot r} - \cos \beta \cdot \cos \operatorname{arctg} f - \sin \beta \cdot \sin \operatorname{arctg} f} + \left[ \frac{\pi \cdot \rho \cdot l}{2R_n^2} (R_n^4 - R_k^4) + \frac{J_0}{R_n^2} \right] a_n. \quad (9)$$

На втором этапе исследования была поставлена задача определения силы натяжения гибкого элемента в момент выхода его в грунт из полости рабочего органа бестраншейной машины. Рассмотрено две наиболее характерные схемы укладки в грунт гибких материалов (рис. 3).

После сматывания с барабана 2 гибкой дренажной трубы 3 (рис. 3а) сила  $T_1$  натяжения трубы, рассчитанная по формуле (9), в процессе дальнейшего движения трубы в полости рабочего органа увеличивается за счет трения трубы о направляющую поверхность 6 рабочего органа. На выходе из полости рабочего органа силу  $T_2$  натяжения трубы рассчитывают по формуле Л. Эйлера:

$$T_2 = T_1 e^{\alpha_{dm} f_{dm}} = T_1 e^{(\pi/2 - \beta_{dm}) f_{dm}}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{dm}$  – угол обхвата трубой 3 направляющей поверхности 6 (рис. 3а), рад;  $\beta_{dm}$  – угол отклонения от вертикали направления сматывания дренажной трубы с барабана, рад;  $f_{dm}$  – коэффициент трения поверхности дренажной трубы 3 о направляющую поверхность 6 рабочего органа.

Сила  $P_1$  натяжения пленки, сматываемой с рулона 7 (рис. 3б), которая также может быть рассчитана по формуле (9), увеличивается до величины  $P_2$  в процессе разворота пленки на поверхности пластины 9. Соотношение между силой  $P_1$  натяжения набегающей ветви 8 полосы пленки и силой натяжения  $P_2$  сбегающей ветви 10 полосы пленки рассчитывают по формуле [10]:

$$P_2 = P_1 e^{\alpha_n f_n \cos \varphi}, \quad (11)$$

где  $\alpha_n$  – угол обхвата полосой пленки поверхности пластины 9 (рис. 3б), рад;  $f_n$  – коэффициент трения поверхности пленки о поверхность пластины 9;  $\varphi$  – угол отклонения направления движения полосы пленки от плоскости нормальной к направляющей поверхности пластины 9, град.

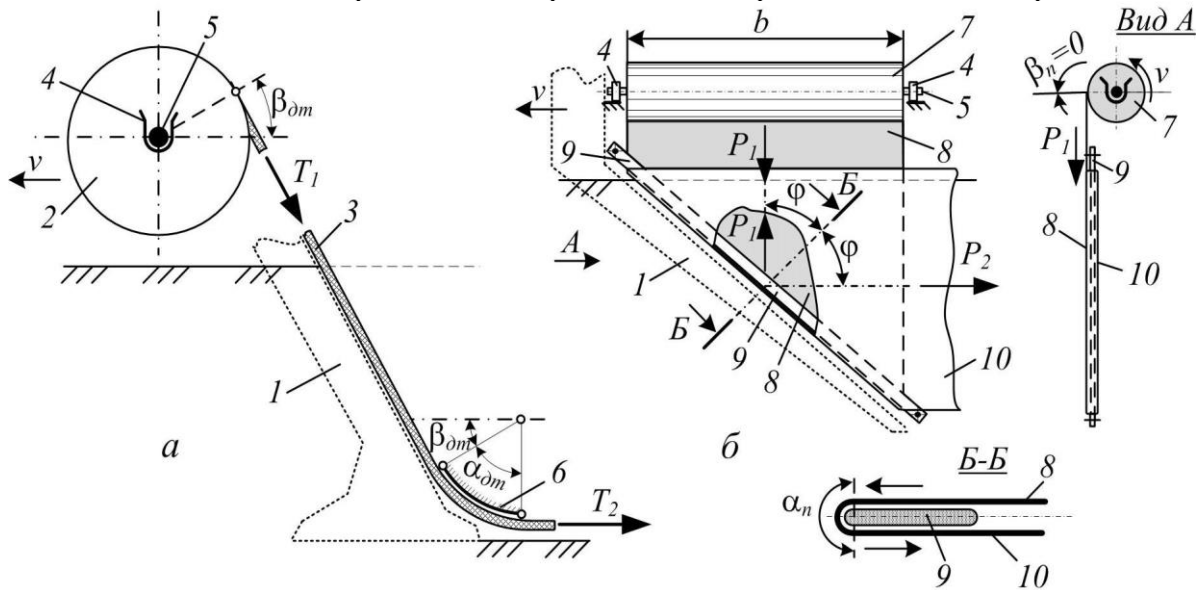


Рис. 3. К расчету сил натяжения гибких дренажных и противофильтрационных материалов, укладываемых бестраншейными машинами: а – схема укладки трубчатого дренажа; б – схема укладки вертикального противофильтрационного экрана из полимерной пленки; 1 – землеройный рабочий орган бестраншейной машины; 2 – барабан; 3 – гибкая дренажная труба; 4 – вилочная опора; 5 – цапфа; 6 – направляющая поверхность движения дренажной трубы; 7 – рулон пленки; 8 – набегающая ветвь полосы пленки; 9 – пластина разворота пленки; 10 – сбегающая ветвь полосы пленки

Подставив в формулы (10) и (11) значения сил  $T_1$  и  $P_1$ , рассчитанные по формуле (9), а также приняв во внимание некоторые конструктивные особенности укладчика пленочных экранов ( $J_0=0$ ;  $\beta_n=0^0$ ), величины сил  $T_2$  и  $P_2$  натяжения дренажной трубы и полосы пленки на выходе их из рабочих органов бестраншейных машин определяют по формулам:

$$T_2 = \left\{ \frac{m_{нд} \cdot g \cdot \cos \arctg f}{\frac{R_n}{f \cdot r} - \cos \beta_0 \cdot \cos \arctg f - \sin \beta_0 \cdot \sin \arctg f} + \left[ \frac{\pi \cdot \rho_d \cdot b}{2R_n^2} (R_n^4 - R_k^4) + \frac{J_0}{R_n^2} \right] a_n \right\} e^{(\pi/2 - \beta_{dm}) f_{dm}}, \quad (12)$$

$$P_2 = \left\{ \frac{m_{mn} \cdot g \cdot \cos \arctg f}{\frac{R_n}{f \cdot r} - \cos \arctg f} + \left[ \frac{\pi \cdot \rho_{mn} \cdot b}{2R_n^2} (R_n^4 - R_k^4) \right] a_n \right\} e^{\alpha_n f_n \cos \varphi}, \quad (13)$$

где  $m_{нд}$  и  $m_{mn}$  – масса барабана с дренажной трубой и масса рулона с пленкой в начале укладки, кг;  $\rho_d$  – объемная плотность дренажной трубы в барабане, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{mn}$  – плотность материала пленки, кг/м<sup>3</sup>.

На третьем этапе исследования была поставлена и решена задача определения условий прочности на разрыв дренажной трубы и рулонной пленки в процессе их укладки бестраншейным способом.

Прочность на разрыв дренажных труб, сматываемых с установленных на подшипниках скольжения барабанов и укладываемых бестраншейными машинами достигается при условии:

$$T_2 \leq [T]_{dm} = \frac{K_{dm} \cdot \sigma_{mm}^{mk} \cdot \pi (D_{dm}^2 - d_{dm}^2)}{4}, \quad (14)$$

где  $T_2$  – сила натяжения дренажной трубы на выходе ее из рабочего органа, рассчитанная по формуле (12), Н;  $[T]_{dm}$  – максимально допустимая сила натяжения дренажной трубы, Н;  $K_{dm}$  – коэффициент запаса прочности дренажной трубы на растяжение ( $K_{dm} \cong 0,7$ );  $\sigma_{mm}^{mk}$  – предел текучести материала трубы, Па;  $d_{dm}$  и  $D_{dm}$  – внутренний и наружный диаметр дренажной трубы, м.

Условием качественной (без разрывов и пластических деформаций) укладки рулонной пленки при строительстве вертикальных противофльтрационных экранов бестраншейным способом является:

$$P_2 \leq [P]_n = K_n \cdot \sigma_{nn}^{mk} \cdot \delta_n \cdot b, \quad (15)$$

где  $P_2$  – сила натяжения полосы пленки на выходе ее из рабочего органа, рассчитанная по формуле (13), Н;  $[P]_n$  – максимально допустимая сила натяжения полосы пленки, Н;  $K_n$  – коэффициент запаса прочности полосы пленки на растяжение ( $K_n \cong 0,7$ );  $\sigma_{nn}^{mk}$  – предел текучести материала пленки, Па;  $\delta_n$  – толщина пленки, м.

### **Заключение**

Установлено, что для защиты от вредного воздействия поверхностных и грунтовых вод может быть эффективно использован бестраншейный способ строительства как водопроводящих (дренажных), так и водозадерживающих сооружений (плотин, дамб, перемычек) с противофльтрационными экранами, завесами, диафрагмами.

Получены аналитические зависимости, определяющие условия прочности на разрыв дренажной трубы и рулонной пленки в процессе их укладки бестраншейным способом.

Поскольку бестраншейный способ строительства дренажных и водозадерживающих сооружений может быть эффективно использован при условии качественного прохождения без разрывов и повреждений гибких дренажных и противофльтрационных материалов через полости рабочих органов бестраншейных машин, выполненное исследование является актуальным, имеет научную новизну и практическую ценность.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке проектов гидротехнических мероприятий защиты от вредного воздействия вод, а также рабочих органов бестраншейных машин.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Петроченко, В. И. Оптимизация проектных решений защиты от паводков в речных бассейнах / В. И. Петроченко, А. В. Петроченко // Мелиорация. – 2019. – №2. – С. 26–33.
2. Казаков, В. С. Бестраншейные дреноукладчики / В. С. Казаков. – М.: Россельхозиздат. – 1974. – 62 с.
3. Томин, Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа / Е. Д. Томин. – М.: Колос, 1981. – 240 с.
4. А. с. 1211378 / СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Укладчик вертикального противофльтрационного экрана / В. И. Петроченко; заявл. 16.08.84; опубл. 15.02.86, Бюл. №6.
5. Петроченко, В. И. Бестраншейная укладка пленочных завес на рисовых системах / В. И. Петроченко // Гидротехника и мелиорация. – 1986 – № 2. – С. 27–29.
6. Ярусный способ сооружения плотин с пленочными диафрагмами. – Информационный листок №9-86-НТД, серия 67.17.41. Черниговский ЦНТИ, 1986.
7. А. с. 1133331 / СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Способ сооружения грунтовой дамбы с пленочной диафрагмой / В. И. Петроченко; заявл. 18.07.83; опубл. 07.01.85, Бюл. №1.
8. А. с. 1168653 / СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Грунтовая дамба с противофльтрационным ядром / В. И. Петроченко, Л. Ю. Гальчинский; заявл. 14.10.83; опубл. 23.07.85, Бюл. №27.
9. А. с. 1209749 / СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Способ сооружения грунтовой дамбы с пленочной диафрагмой / В. И. Петроченко; заявл. 16.08.84; опубл. 07.02.86, Бюл. №5.
10. Петроченко, В. И. Исследование силы трения наклонного скольжения рулонных материалов о направляющие поверхности мелиоративных машин / В. И. Петроченко // Вестник БГСХА. – 2018. – №3 – С. 176–179.