

УДК 624.016: 626 : 502/504

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МОЖЛИВОСТІ З'ЄДНАННЯ РУЛОННОЇ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ПЛІВКИ КЛЕЙОВИМИ ШВАМИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПРОТИПАВОДКОВИХ ДАМБ З ДІАФРАГМАМИ

О.В. Петроченко,

канд. техн. наук

Національний авіаційний університет, проспект Любомира Гузара, 1, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.370-380

Проведено теоретичні дослідження напружено-деформованого стану клейових швів тонких плівок, що підкоряються закону Гука, а також експериментальні дослідження міцності клейових швів плівок, виготовлених з поліетилену, який не має достатньої адгезії до клеїв. Проведено натурні дослідження операції склеювання поліетиленової плівки в умовах будівництва протифільтраційних діафрагм. За результатами досліджень встановлено умови, за яких стає можливим з'єднання гідротехнічної поліетиленової плівки клейовими швами в окремих будівельних процесах, зокрема при безтраншейному укладанні плівки під час будівництва протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами.

Ключові слова: клейовий шов, напружено-деформований стан, модуль пружності, нормальні та дотичні напруження, міцність на розтягування, поліетиленова плівка, протифільтраційна діафрагма, протипаводкова дамба.

Вступ. Головним напрямом підвищення ефективності будівельного виробництва є впровадження конкурентоспроможних інноваційних технологій. Однак, на відміну від перевірених на практиці традиційних технологій, інноваційні технології потребують наукового обґрунтування, яке зазвичай здійснюють у дві стадії. Спочатку, користуючись певними методами та алгоритмами синтезу технічних рішень, визначають найбільш конкурентоспроможний інноваційний варіант будівництва інженерних споруд або систем, техніко-економічні показники якого перевищують показники як традиційних, так і інших альтернативних інноваційних варіантів. Потім, виконують наукові дослідження з обґрунтування технологічної можливості здійснення окремих технологічних операцій та всього інноваційного варіанту будівництва, визначеного на першій стадії його обґрунтування.

Постановка проблеми. На першій стадії наукового обґрунтування ефективної технології будівництва протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами було визначено низку ефективних технологічних варіантів, а основу яких покладено використання нового високопродуктивного безтраншейного способу укладання на глибину до 2 м протифільтраційних завіс з рулонної поліетиленової плівки (рис. 1). Процес укладання плівки відбувається циклами. Кожен попередній цикл завершується укладанням плівки попереднього рулону, а кожен наступний цикл починається з операції з'єднання кінців плівок попереднього рулону з наступним. Відомо, що надійним способом з'єднання поліетиленової плівки є зварювання. Але зваживши на те, що укладання плівки безтраншейним способом відбувається в темпі руху базового трактору, з'єднання плівки з використанням зварювальних пристроїв буде значно ускладнювати та уповільнювати процес.

Визначено, що тривалість операції зварювання плівки становить близько 40% тривалості виконання усіх інших операцій процесу безтраншейного укладання плівки. Проте для операції склеювання плівки цей показник не перевищує 13%. Отже, використання операції склеювання плівки, порівняно з використанням операції зварювання, забезпечує підвищення продуктивності процесу безтраншейного укладання плівки у середньому на 45% $((1 - 0,13):(1 - 0,4) = 1,45)$. Однак відомо, що поліетилен, будучи неполярним полімером, не має достатньої адгезії до клеїв [1]. У зв'язку з цим постає потреба наукового обґрунтування можливості досягнення міцності клейового шва 4 (рис. 1) достатньої для протягування плівки через порожнину робочого органу 1.

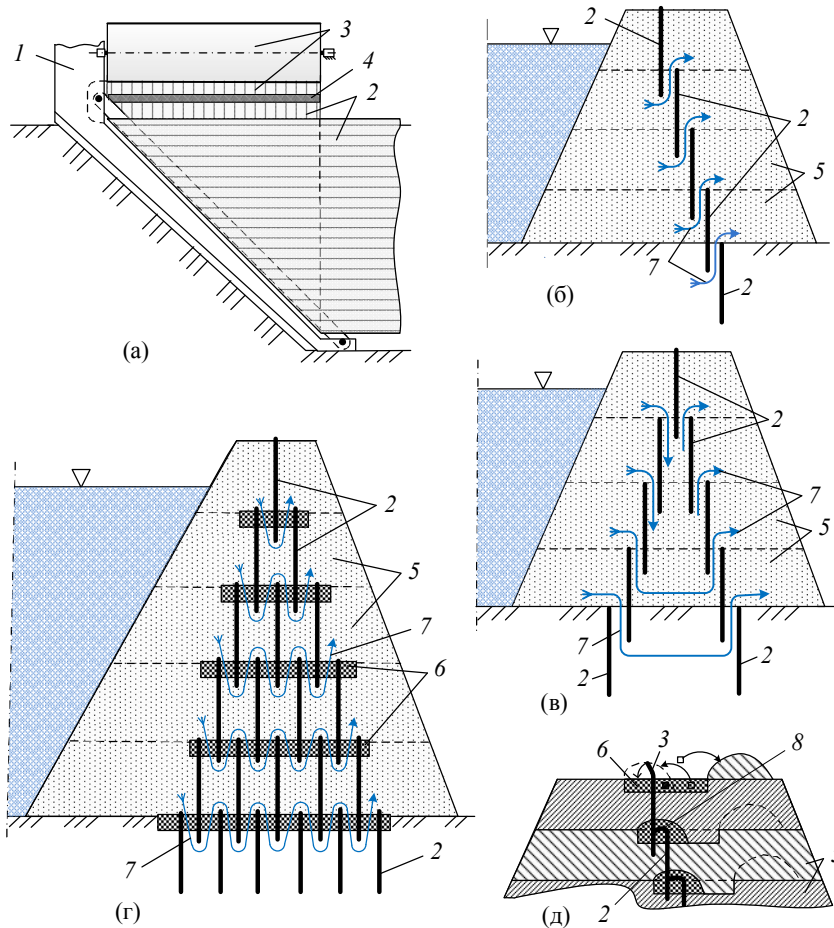


Рис. 1. Конструкції земляних протиаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами, побудованими з укладеної безтраншейним способом рулонної поліетиленової плівки: схема безтраншейного укладання рулонної плівки (а); дамба з однорядною діафрагмою (б); дамба з дворядною діафрагмою (в); дамба з протифільтраційним ядром з рулонної плівки (г); схема спорудження дамби та діафрагми з протифільтраційними замками (д); робочий орган укладача рулонної плівки (1); плівка попередньо укладеного рулону (2); плівка наступного рулону (3); клейовий шов (4); ярус дамби (5); прошарок глини (6); шлях фільтрації через діафрагму (7); протифільтраційний замок з верхньої кромки плівки (8)

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Найбільш поширеним типом клейових з'єднань плоских елементів є з'єднання внапуск (рис. 2).

Клейовим швам внапуск присвячено найбільшу кількість робіт [2-8]. Експериментально встановлено, що руйнація шва починається біля краю напуску. У зв'язку з чим вважалось, що руйнівна напруга не залежить від ширини шва b (рис. 2), але збільшується зі збільшенням довжини шва. У цій постановці приймається, що елементи шва внапуск працюють в межах пружності лише на розтягування, але не працюють на згин, а напруги зсуву створюються лише у шарі клею [6-8].

Проте розподіл дотичних напружень у клейовому прошарку раніше не був достатньо

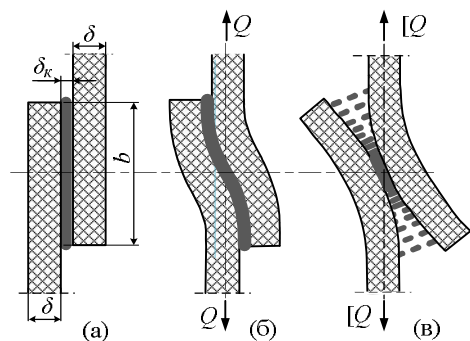


Рис. 2. Стадії роботи клейового шва плівок внапуск на розтягування: до навантаження (а); в період навантаження питомою силою Q (б); в момент критичного навантаження питомою силою $[Q]$ (в)

дослідженням, оскільки в основу таких досліджень автори заклали різні моделі з використанням коефіцієнтів концентрації напруг [9-11]. При цьому клейові шви тонких елементів, що мають малу адгезію до клею, зовсім не досліджувались за причиною, що ці шви не працюють на відрив. В умовах малої адгезії клейові шви не забезпечують цілісності при виготовленні, транспортуванні і монтажу склеєних конструкцій.

У зв'язку з цим, для обґрунтування можливості використання найбільш конкурентоспроможної операції склеювання поліетиленової плівки в окремих будівельних процесах, зокрема в процесі безтраншейного укладання рулонної плівки в процесі будівництва земляних протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами, виникає потреба проведення наукових досліджень міцності на розтягування клейових швів внапуск поліетиленової плівки.

Метою даного дослідження є наукове обґрунтування можливості з'єднання рулонної поліетиленової плівки клейовими швами внапуск в процесі її безтраншейного укладання при будівництві протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами.

Напрями, об'єкти та результати дослідження

1. Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану клейового шва внапуск плівок, виготовлених з пружних матеріалів

Об'єктом теоретичного дослідження обрано клейовий шов тонких пружних плівок 1 і 2 довжиною $l=1\text{м}$ та шириною напуску b (рис. 3).

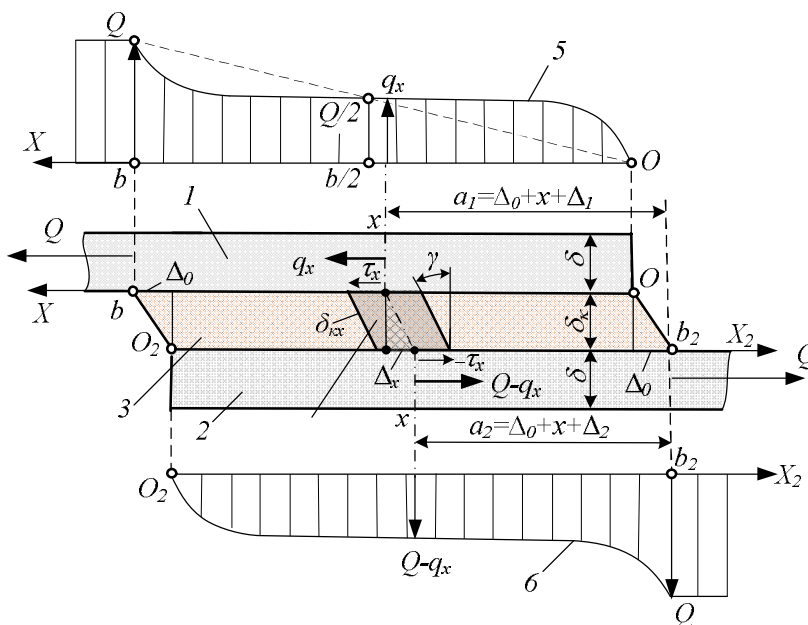


Рис. 3. Поперечний переріз клейового шва пружних плівок у напружено-деформованому стані: верхня плівка (1); нижня плівка (2); прошарок клею (3); елементарна призма клею (4); графік питомої розтяжної сили плівки 1 (5); графік питомої розтяжної сили плівки 2 (6)

Для встановлення теоретичних залежностей міцності клейового шва пружних плівок (або тонких оболонок) приймаються такі передумови. Плівки 1 і 2 виконані з однорідної речовини, мають однакову товщину δ і склеєні внапуск прошарком клею 3 рівномірної товщини δ_k (рис. 3). Величина адгезії по всій поверхні склеювання розподілена рівномірно. Вплив згинаючих зусиль в клейовому шві малий, жорсткість шва на згин дорівнює нулю. Напруги в клейовому шві не перевищують межу пружності матеріалу плівок і клею, які підкоряються закону Гука. Через малу товщину клейового шва плівка площина склеювання встановлюється паралельно прикладеному навантаженню. Товщина плівок δ і товщина прошарку клею δ_k при розтягуванні шва приймаються незмінними.

Розглянемо вздовж координатної осі OX поперечний переріз шва в напружено-деформованому стані. На основі прийнятих початкових передумов прошарок клею 3 в напружено-деформованому стані буде сприймати напругу чистого зсуву. На координаті x виділимо елементарну призму 4 прошарку клею 3. При розтягуванні шва на верхній та нижній основі призми 4 виникають однакові за величиною та протилежно спрямовані дотичні напруження τ_x і $-\tau_x$. Відповідно до закону Гука на зсув величина τ_x визначається за формулою:

$$\tau_x = \frac{dq_x}{dx} = \frac{E_\kappa}{2(1-\mu_\kappa)} \gamma = G_\kappa \gamma, \quad (1)$$

де q_x – питома сила розтягування плівки 1 на координаті x , Н/м; E_κ – модуль пружності прошарку клею при розтягуванні, Па; μ_κ – коефіцієнт Пуассона клею; G_κ – модуль пружності клею на зсув, Па.

Скориставшись властивістю малих кутів ($\sin \gamma \approx \tan \gamma \approx \gamma$), дотичні напруження на зсув τ_x при розтягуванні шва визначаються за формулою:

$$\tau_x = \frac{dq_x}{dx} = G_\kappa \frac{\Delta_x}{\delta_\kappa}, \quad (2)$$

де δ_κ – товщина прошарку клею, м; Δ_x – відносне зміщення склеєних поверхонь плівок 1 і 2 на координаті x , м.

Визначимо Δ_x через абсолютні переміщення a_1 верхньої і a_2 нижньої основи елементарної призми 4 вздовж осі OX на координаті x .

$$\Delta_x = a_1 - a_2 = (\Delta_0 + x + \Delta_1) - (\Delta_0 + x + \Delta_2) = \Delta_1 - \Delta_2, \quad (3)$$

де Δ_1 – збільшення довжини ділянки Ox склеєної поверхні плівки 1 при розтягуванні шва питомою силою Q , м; Δ_2 – збільшення довжини ділянки b_2x склеєної ділянки плівки 2 при розтягуванні шва силою Q , м; Δ_0 – відносне зміщення поверхонь плівок 1 і 2 на межах шва, м.

Підставимо значення Δ_x з (3) в (2):

$$\frac{dq_x}{dx} = \frac{G_\kappa}{\delta_\kappa} (\Delta_1 - \Delta_2). \quad (4)$$

Диференціюючи по x рівняння (4), маємо:

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = \frac{G_\kappa}{\delta_\kappa} \left(\frac{d\Delta_1}{dx} - \frac{d\Delta_2}{dx} \right). \quad (5)$$

Використовуючи закон Гука при розтягуванні плівок 1 і 2 довжиною dx , визначимо диференціали:

$$\frac{d\Delta_1}{dx} = \frac{q_x}{\delta E}, \quad \frac{d\Delta_2}{dx} = \frac{Q - q_x}{\delta E}, \quad (6)$$

де δ – товщина плівок, м; E – модуль пружності при розтягуванні матеріалу плівок, Па.

Підставивши значення диференціалів з (6) в (5), отримуємо диференціальне рівняння напружено-деформованого стану шва плівок:

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} = \frac{G_\kappa}{E \delta \delta_\kappa} (2q_x - Q). \quad (7)$$

Позначивши в рівнянні (7) вираз $\frac{G_\kappa}{E \delta \delta_\kappa}$ через U^2 , маємо рівняння:

$$\frac{d^2 q_x}{dx^2} - 2U^2 q_x = -U^2 Q. \quad (8)$$

Для розв'язку неоднорідного диференційного рівняння другого типу (8) скористаємося характеристичним рівнянням $\lambda^2 - 2U^2 = 0$, рішенням якого буде $\lambda = \pm U\sqrt{2}$. Питому силу q_x представимо функцією:

$$q_x = C_1 e^{U\sqrt{2}x} + C_2 e^{-U\sqrt{2}x} + \frac{Q}{2}, \quad (9)$$

де C_1 і C_2 – коефіцієнти; e – основа натуральних логарифмів; $Q/2$ – частинне рішення рівняння (8).

З урахуванням граничних умов (рис. 3):

$$\left. \begin{matrix} x=0 \\ q_x=0 \end{matrix} \right\}; \left. \begin{matrix} x=b \\ q_x=Q \end{matrix} \right\} \quad (10)$$

коефіцієнти C_1 і C_2 функції (9) визначаються з системи рівнянь:

$$\left. \begin{matrix} q_{x=0} = C_1 + C_2 + \frac{Q}{2} = 0; \\ q_{x=b} = C_1 e^{U\sqrt{2}b} + C_2 e^{-U\sqrt{2}b} + \frac{Q}{2} = Q \end{matrix} \right\}. \quad (11)$$

Після перетворень функція (9) має вид:

$$q_x = \frac{Q}{2} \left[\frac{e^{U\sqrt{2}x} - e^{U\sqrt{2}(b-x)}}{e^{U\sqrt{2}b} - 1} + 1 \right]. \quad (12)$$

Взявши похідну по x від q_x , отримаємо функцію τ_x розподілу дотичних напружень вздовж осі OX :

$$\frac{dq_x}{dx} = \tau_x = \frac{QU}{\sqrt{2}} \frac{e^{U\sqrt{2}x} + e^{U\sqrt{2}(b-x)}}{e^{U\sqrt{2}b} - 1} \quad (13)$$

Максимальну величину дотичних напружень τ^{\max} маємо в граничних точках шва ($x=0$; $x=b$):

$$\tau^{\max} = \tau_{x=0} = \tau_{x=b} = \frac{QU}{\sqrt{2}} \frac{e^{U\sqrt{2}b} + 1}{e^{U\sqrt{2}b} - 1}. \quad (14)$$

Шляхом диференціювання функції (13) за умови:

$$\frac{d\tau_x}{dx} = \frac{QU^2}{e^{U\sqrt{2}b} - 1} (e^{U\sqrt{2}x} - e^{U\sqrt{2}(b-x)}) = 0 \quad (15)$$

визначається мінімальна величина τ^{\min} , яка спостерігається вздовж середньої лінії шва на координаті $x=b/2$

$$\tau^{\min} = \tau_{x=b/2} = \frac{QU\sqrt{2}e^{U\sqrt{2}b/2}}{e^{U\sqrt{2}b} - 1}. \quad (16)$$

Клейовий шов буде працювати без руйнації за умови:

$$[\tau] \geq \tau^{\max} = \tau_{x=0} = \tau_{x=b}, \quad (17)$$

де $[\tau]$ – адгезія (адгезійна міцність) на зсув клею з поверхнею плівок, Па.

Підставивши в формулу (14) $[\tau]$ замість $|\tau|^{\max}$, а також $[Q]_b$ замість Q , визначимо питому міцність $[Q]_b$ шва пружних плівок на розтягування як функцію аргументу b :

$$[Q]_b = \frac{\sqrt{2}[\tau]}{U} \frac{e^{U\sqrt{2}b} - 1}{e^{U\sqrt{2}b} + 1}, \quad (18)$$

або

$$[Q]_b = \sqrt{2}[\tau] \sqrt{\frac{E\delta\delta_\kappa}{G_\kappa}} \frac{e^{\sqrt{\frac{2G_\kappa}{E\delta\delta_\kappa}}b} - 1}{e^{\sqrt{\frac{2G_\kappa}{E\delta\delta_\kappa}}b} + 1}. \quad (19)$$

Оскільки $e^{U\sqrt{2}b} \gg 1$, величина $\frac{e^{U\sqrt{2}b} - 1}{e^{U\sqrt{2}b} + 1}$ зі збільшенням b асимптотично наближається до

1, то величина $\frac{\sqrt{2}[\tau]}{U} = \sqrt{2}[\tau] \sqrt{\frac{E\delta\delta_\kappa}{G_\kappa}}$ є асимптотою функції $[Q]_b$.

За результатами розрахунків за формулою (19) питомої міцності на зсув $[Q]_b$ клейового шва пружних плівок було встановлено, що функція $[Q]_b$ практично не зростає від аргументу b на відкритому проміжку значень $0,01\text{м} < b < \infty$. Тому, якщо ширина напуску плівок перевищує

10 мм, питома міцність $[Q]$ клейових швів пружних плівок, може бути оцінена величиною асимптоти функції $[Q]_b$ за формулою:

$$[Q] \equiv \sqrt{2}[\tau] \sqrt{\frac{E\delta\delta_k}{G_k}}. \quad (20)$$

Таким чином, основним результатом теоретичного дослідження є встановлена за формулою (19) можливість підвищення питомої міцності на розтягування $[Q]$ клейового шва внапуск тонких елементів будівельних конструкцій в умовах малої адгезії $[\tau]$ за двома напрямками: використанням клеїв з малим модулем пружності на зсув G_k ; збільшенням товщини прошарку клею δ_k за умови, що величина адгезії $[\tau]$ не перевищує величину когезії клею. Основний результат теоретичного дослідження використано в якості гіпотези наступного експериментального дослідження міцності клейових швів плівки.

2. Експериментальне дослідження міцності клейових швів поліетиленової плівки

Об'єктом експериментального дослідження обрано клейові шви внапуск зразків гідротехнічної плівки, виготовленої з поліетилену низького тиску (ПНТ) з базовими параметрами: $E=196$ МПа; $\delta=0,0002$ м (200 мкм); $l=0,02$ м (довжина шва, яка відповідає ширині зразків плівки). Межа міцності поліетилену ПНТ становить $\tau_n=9,8$ МПа, що відповідає межі міцності $Q_{mi}=1960$ Н/м зразків плівки товщиною $\delta=0,0002$ м. Межа плинності поліетилену ПНТ становить $\tau_n=8,05$ МПа, що відповідає межі плинності $Q_{nl}=1610$ Н/м зразків плівки товщиною $\delta=0,0002$ м. Ширина швів b становила: 0,002 м; 0,005 м; 0,01 м; 0,02 м; 0,03 м.

Склеювання зразків плівки здійснювали за допомогою наїритового клею у вигляді 15% розчину в етилацетаті наїритового каучуку з базовими параметрами: $E_k=7,8$ МПа; $\mu=0,47$; $G_k=7,4$ МПа. Товщина δ_k прошарку клею (каучуку) становила: 0,0001 м; 0,0003 м; 0,0005 м.

Адгезію клею з поверхнею плівки $[\tau]$ визначали за схемою на рис. 4. Для цього спочатку до двох зразків плівки 1 і 2 термопластичним способом прикріплювали виготовлені з поліетилену ПНТ накладні елементи жорсткості 3 і 4 розміром: $l=0,02$ м; $b_n=0,05$ м; $\delta_n=0,02$ м (рис. 4). Потім плівки 1 і 2 склеювали і здійснювали розтягування шва на розривній машині МР-05-1. Приймалось, що при розтягуванні клейового шва елементи жорсткості 3 і 4 забезпечують рівномірний розподіл дотичних напружень τ_x по ширині шва b_n . Це дало змогу визначити середню по площині склеювання величину адгезії $[\tau]$ за формулою [2]:

$$[\tau] = \frac{[P]}{lb_n} = \frac{[Q]}{b_n} = 1,63 \text{ МПа}, \quad (21)$$

де $[P]$ – розривне зусилля при розтягуванні шва за схемою на рис. 4, Н.

Питому міцність на розтягування $[Q]_b$ клейових швів внапуск зразків поліетиленової плівки випробували на розривній машині МР-05-1 при швидкості розтягування 80 мм/хв. (рис. 5). Результати випробувань представлено в таблиці 1 та на рис. 6.

Для порівняння результатів теоретичного і експериментального дослідження міцності клейових швів на розтягування в таблиці 1 та на рис. 6 поруч з експериментальними показниками питомої міцності поліетиленової плівки наведено показники питомої міцності умовної плівки, розраховані за формулою (19). Умовною плівкою вважається плівка, фізико-механічні параметри якої співпадають з фізико-механічними параметрами поліетиленової плівки. Проте приймається, що матеріал умовної плівки підкорюється закону Гука.

Аналіз результатів теоретичного і експериментального дослідження міцності клейових швів плівок свідчить про те, що визначені за формулою (19) показники питомої міцності $[Q]_b$

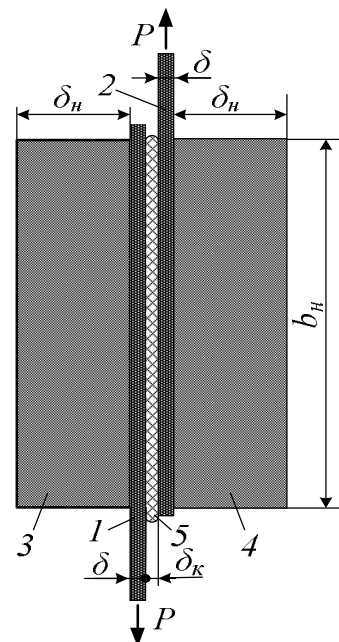


Рис. 4. Схема визначення адгезії $[\tau]$ наїритового клею до поліетилену: 1 і 2 – зразки поліетиленової плівки; 3 і 4 – елементи жорсткості з поліетилену, приварені до плівок 1 і 2; 5 – прошарок клею

клеюваних швів умовної (пружної) плівки більші за величиною, а також більш залежать від товщини прошарку клею δ_k , порівняно з експериментальними показниками питомої міцності $[Q]_b$ клейових швів поліетиленової плівки.

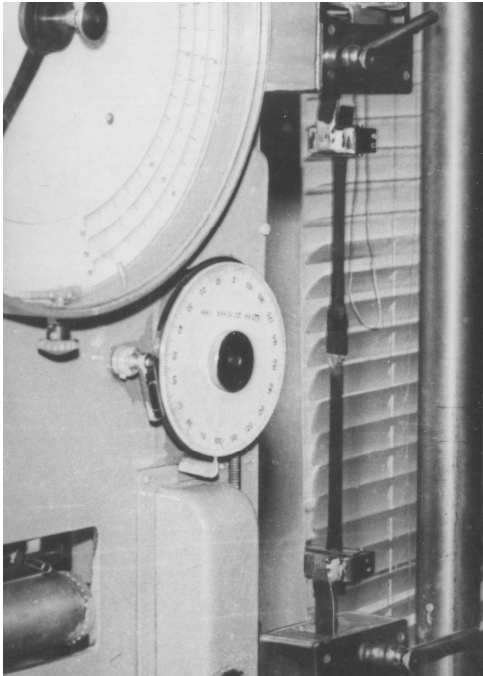


Рис. 5. Випробування на машині МР-05-1 питомої міцності на розтягування $[Q]_b$ клейових швів внапуск зразків гідротехнічної поліетиленової плівки

Це пояснюється тим, що поліетилен тільки частково підкорюється закону Гука. При напруженні з'єднаних клейовими швами зразків поліетиленової плівки відбуваються пружні і пластичні деформації.

Встановлено також, що питома міцність $[Q]_b$ клейових швів поліетиленової плівки досягає максимальних значень при більших величинах ширини швів b , порівняно з питомою міцністю $[Q]_b$ аналогічних варіантів швів умовної плівки. Це пояснюється нерівномірним розподілом адгезії $[\tau]$ по площині склеювання, у зв'язку з варіюванням локальних сил молекулярного зчеплення поліетилену з клеєм, а також нерівномірним розподілом товщини прошарку клею δ_k по площині склеювання. Враховуючи асимптотичний характер графіків 7, 8 і 9, функція міцності поліетиленової плівки $[Q]_b$ при певній ширині шва b практично не залежить від її величини. При збільшенні навантаження клейового шва шириною $b > 0,005 \dots 0,01$ м шов починає поступово руйнуватись на одній, або зразу на двох своїх межах. Межі шва переміщуються у напрямку до центру ширини напуску. При ширині p частково зруйнованого шва переміщення меж шва тимчасово припиняється, а опір розтягуванню шва набуває

найбільшого значення. Це відбувається при такому співвідношенні параметрів:

$$p < b; \tau_p^l > [\tau]; \delta_{kp}^l > \delta_k; Q_p(\tau_p^l, \delta_{kp}^l) > [Q]_b([\tau], \delta_k), \quad (22)$$

де τ_p^l – середнє по довжині шва l значення величини адгезії на межах шва шириною p , Па; δ_{kp}^l – середнє по довжині шва l значення товщини прошарку клею на межах шва шириною p , м; $[Q]_b([\tau], \delta_k)$ – питома міцність шва при рівномірному розподілі по площині склеювання адгезії і товщини прошарку клею, Н/м; $Q_p(\tau_p^l, \delta_{kp}^l)$ – питома міцність шва при нерівномірному розподілі по площині склеювання адгезії і товщини прошарку клею, Н/м.

Таблиця 1

Розрахункові і експериментальні показники питомої міцності на розтягування $[Q]_b$ клейових швів внапуск умовної і поліетиленової плівки

δ_k , м	0,0001				0,0003				0,0005			
Показники міцності клейових швів умовної плівки, розраховані за формулою (19)												
b , м	0,002	0,005	0,01	0,02	0,002	0,005	0,01	0,02	0,002	0,005	0,01	0,02
$[Q]_b$, Н/м	1592	1661	1662	1662	2779	2872	2896	2896	2621	3643	3738	3738
Експериментальні дані міцності клейових швів поліетиленової плівки												
b , м	0,005	0,01	0,02	0,03	0,005	0,01	0,02	0,03	0,005	0,01	0,02	0,03
$[Q]_b$, Н/м	1192	1321	1625	1710	1236	1494	1837	1956	1488	1825	1958	1963*

Примітка: **1963*** – питома сила розриву поліетиленової плівки за межами клейового шва.

Очевидно, що зі збільшенням ширини клейових швів b зразків поліетиленової плівки збільшується імовірність настання ситуацій, відповідних співвідношенню (22). Тому питома міцність $[Q]_b$ швів поліетиленової плівки досягає максимальних значень при більших величинах ширини швів b , порівняно з розрахованою за формулою (19) питомою міцністю $[Q]_b$ аналогічних варіантів швів умовної плівки.

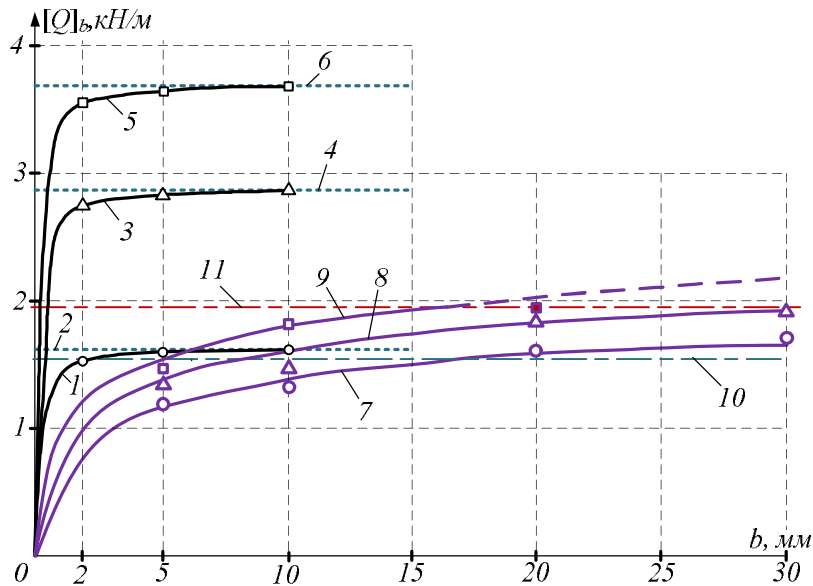


Рис. 6. Графіки питомої міцності $[Q]_b$ на розтягування клейових швів умовної (пружної) і поліетиленової плівки залежно від ширини шва b і товщини прошарку клею δ_k : графік і асимптота функції $[Q]_b$ міцності клейових швів умовної плівки, розраховані при товщині прошарку клею $\delta_k=0,1$ мм (1 і 2), $\delta_k=0,3$ мм (3 і 4), $\delta_k=0,5$ мм (5 і 6); графіки експериментальної залежності $[Q]_b$ питомої міцності на розтягування клейових швів зразків поліетиленової плівки при товщині прошарку клею $\delta_k=0,1$ мм (7), $\delta_k=0,3$ мм (8), $\delta_k=0,5$ мм (9); межа плинності і межа міцності поліетиленової плівки (10 і 11)

За результатами експериментального дослідження на розтягування зразків поліетиленової плівки товщиною 0,2 мм, склеєних клеєм на основі наїритового каучуку, було визначено мінімальну величину питомої розривної сили $[Q]_b=1192$ Н/м при ширині шва $b=5$ мм і товщині прошарку клею $\delta_k=0,1$ мм і максимальну величину $[Q]_b=1963$ Н/м при $b=30$ мм і $\delta_k=0,5$ мм. Для практичного використання клейових швів в окремих процесах гідротехнічного будівництва рекомендовано застосовувати клеї на каучуковій основі при параметрах шва: $b=25\pm 5$ мм; $\delta_k=0,5\pm 0,1$ мм.

3. Натурні дослідження операції склеювання поліетиленової плівки при будівництві дамб з протифільтраційними діафрагмами

Натурні дослідження операції склеювання поліетиленової плівки проводили під час будівництва: дамб обвалування рисових чеків в Одеській області; земляної греблі на річці Снов Чернігівської області; протиаводкових дамб на річках Карпатського регіону. Будівництво дамб з протифільтраційними діафрагмами здійснювали з використанням безтраншейного укладача рулонної полімерної плівки (рис. 7), який забезпечує укладання плівки в темпі руху базового трактора (рис. 8).



Рис. 7. Безтраншейний укладач рулонної полімерної плівки на глибину 1,5 м



Рис. 8. Укладання рулонної плівки в основі земляної дамби

По завершенню технологічного циклу безтраншейного укладання в ґрунт попереднього рулону плівки кінці попереднього і наступного рулонів з'єднували клейовими швами шириною напуску $b=30$ мм при товщині $\delta_k=0,1...0,3$ мм прошарку клею, виготовленого на основі наїритового каучуку.

Розрахунок за відповідною методикою процесу механічного протягування плівки через порожнину робочого органу безтраншейного укладача (рис. 7) показує, що з урахуванням сили тертя плівки о направляючі поверхні, а також динамічних навантажень, максимальна питома сила натягу плівки складає 760 Н/м. Ця величина значно менше питомої міцності на розтягування $[Q]=1710...1956$ Н/м клейового шва поліетиленової плівки з параметрами $\delta_k=0,1...0,3$ мм і $b=30$ мм, визначеної за результатами експериментального дослідження (таблиця 1).

Висновки

Відзначено техніко-економічну ефективність застосування в деяких інноваційних процесах гідротехнічного будівництва операції склеювання протифільтраційної плівки, виготовленої з поліетилену, який будучи неполярним полімером, не має достатньої адгезії до клеїв.

Доведено можливість склеювання поліетиленової плівки в окремих процесах гідротехнічного будівництва за результатами послідовного проведення: теоретичного дослідження клейового шва внапуск умовної плівки, що підкорюється закону Гука; експериментального дослідження клейових швів поліетиленових плівок; натурних досліджень процесів безтраншейного укладання в ґрунт рулонної поліетиленової плівки з використанням операції склеювання плівки.

За результатами теоретичного дослідження напружено-деформованого стану клейового шва внапуск пружних плівок встановлено аналітичні залежності розподілу питомої сили розтягування плівок і дотичних напружень по ширині клейового шва. Отримано формули розрахунку максимальної і мінімальної величини дотичних напружень в клейовому шві внапуск пружних плівок. Встановлено, що максимальна величина дотичних напружень зосереджена на краях напуску шва, а мінімальна величина – на середній лінії ширини шва. Отримано залежність питомої міцності клейового шва пружних плівок на розтягування як функцію аргументу ширини шва та встановлено асимптотичний характер цієї залежності. Встановлено можливість підвищення питомої міцності на розтягування клейового шва внапуск тонких елементів конструкцій в умовах малої адгезії за двома напрямками: використанням клеїв з малим модулем пружності на зсув; збільшенням товщини прошарку клею за умови, що величина адгезії клею до елементів конструкції менша за його когезію.

За результатами експериментального дослідження на розтягування зразків поліетиленової гідротехнічної плівки товщиною 0,2 мм, склеєних клеєм, виготовленим на основі наїритового каучуку, було визначено мінімальну величину питомої розривної сили шва на розтягування, яка становила $[Q]_b=1192$ Н/м при ширині шва $b=5$ мм та товщині прошарку клею $\delta_k=0,1$ мм, а також максимальну величину цієї сили, яка становила $[Q]_b=1963$ Н/м при $b=30$ мм і $\delta_k=0,5$ мм.

Для практичного використання клейових швів в окремих процесах гідротехнічного будівництва рекомендовано застосовувати клеї на каучуковій основі при параметрах шва: $b=25\pm 5$ мм; $\delta_k=0,5\pm 0,1$ мм.

За результатами натурних досліджень процесів укладання в ґрунт безтраншейним способом рулонної поліетиленової плівки під час будівництва протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами підтверджена можливість склеювання в польових умовах поліетиленової плівки з використанням клею на основі наїритового каучуку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Vinson J.R.* Adhesive bonding of polymer composites // *Polymer Engineering And Science*. – 1989. Vol. 29, No. 19. – P. 1325–1331.
2. Технологія склеювання та герметизації: навчальний посібник / Черкашина Г.М., Авраменко В.Л., Підгорна Л.П. та ін. Харків: Друкарня Мадрид. – 2021. – 199 с.
3. *Короткова С.Е.* Механіка клеєвих соединений. Алчевск: ДГМИ. – 1998. – 187 с.
4. *Zhao X., Adams R.D. & da Silva L.F.* Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2011. – No. 25. – P. 837–856.

5. *Tong L., Sheppard A. & Kelly D.* The effect of adherend alignment on the behavior of adhesively bonded double lap joints // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 1996. – No. 16. – P. 241–247.
6. *Volkersen O.* Recherches sur la theorie des assemblages colles. *Xonstr. metair.*, 1965, №4.
7. *Mylonas C.* On the stress Distribution in Glued Joints. *Proc. 8 Intern. Congr. Appl. Mech. London*, 1948. – v. 4.
8. *Короткова С.Е.* Врахування деформативності клею при розтягу клейового з'єднання тонких листів внапусток // *Опір матеріалів і теорія споруд*. Київ, видавництво «Будівельник». – 1966. – С. 17 – 21.
9. *Kurennov S.S., Poliakov A.G., Barakhov K.P. & Dvoretckaya D.V.* The Nonuniform in Width Stressed State of the Lap Adhesive Joint. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering (ICTM'2019)* : Intern. Sci. and Techn. Conf., Kharkiv, Ukraine; 28–30. – Nov. 2019. Cham (Switzerland), 2020. – P. 75 – 85 (*Advances in Intelligent Systems and Computing* ; Vol. 1113).
10. *Da Silva L.F.M., das Neves P.J.C., Adams R.D. & Spelt J.K.* Analytical models of adhesively bonded joints. Pt. I: Literature survey // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2009. Vol. 29. P. 319–330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.
11. *Osnes H. & Andersen A.* Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap composite joints // *Composites: Pt. B.* – 2003 Vol. 34. – P. 417–427.

REFERENCES

1. *Vinson J.R.* (1989) Adhesive bonding of polymer composites // *Polymer Engineering And Science*. –Vol. 29, No. 19. – P. 1325–1331.
2. *Tekhnolohiya skleyuvannya ta hermetyzatsiyi : navchalnyy posibnyk.* (2021) [Gluing and sealing technology: a study guide] / Cherkashyna H.M., Avramenko V.L., Pidhorna L.P. ta in. Kharkiv : Drukarnya Madryd.
3. *Korotkova S.Ye.* (1998) *Mekhanika kleyevykh soyedineniy* [Mechanics of adhesive joints]. Alchevsk : DGMI.
4. *Zhao X., Adams R.D. & da Silva L.F.* (2011) Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – No. 25. – P. 837–856.
5. *Tong L., Sheppard A. & Kelly D.* (1996) The effect of adherend alignment on the behavior of adhesively bonded double lap joints // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. – No. 16. – P. 241–247.
6. *Volkersen O.* (1965) Recherches sur la theorie des assemblages colles. *Xonstr. metair.* – №4.
7. *Mylonas C.* (1948) On the stress Distribution in Glued Joints. *Proc. 8 Intern. Congr. Appl. Mech. London*. – v. 4.
8. *Korotkova S.E.* (1966) *Vrakhuvannya deformatyvnosti kleyu pry roztyahu kleyovoho z'yednannya tonkykh lystiv vnapustok* [Taking into account the deformability of the glue during the stretching of the adhesive joint of thin sheets in the middle] // *Опір матеріалів і теорія споруд*. Kyiv, vydavnytstvo «Budevlnyky». – 1966. – P. 17 – 21.
9. *Kurennov S. S., Poliakov A. G., Barakhov K. P. & Dvoretckaya D. V.* (2020) The Nonuniform in Width Stressed State of the Lap Adhesive Joint. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering (ICTM'2019)* : Intern. Sci. and Techn. Conf., Kharkiv, Ukraine; 28 – 30. – Nov. 2019. Cham (Switzerland). – P. 75 – 85. (*Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 1113).
10. *Da Silva L.F.M., das Neves P.J., Adams R.D. & Spelt J. K.* (2009) Analytical models of adhesively bonded joints. Pt. I: Literature survey // *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Vol. 29. P. 319–330. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.
11. *Osnes H. & Andersen A.* (2003) Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap composite joints // *Composites: Pt. B.* –Vol. 34. – P. 417–427.

Стаття надійшла 04.08.2024

Петроченко О.В.

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МОЖЛИВОСТІ З'ЄДНАННЯ РУЛОННОЇ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ПЛІВКИ КЛЕЙОВИМИ ШВАМИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПРОТИПАВОДКОВИХ ДАМБ З ДІАФРАГМАМИ

Поліетилен є найпоширенішим матеріалом плівок, які використовують в гідротехнічному будівництві. У процесі будівництва гідротехнічних споруд рулонну поліетиленову плівку, виготовлену в заводських умовах, з'єднують в суцільні протифільтраційні конструкції: екрани, діафрагми, завіси. Надійним способом з'єднання країв поліетиленової плівки є зварювання. Але в окремих випадках, зокрема в процесі будівництва протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами із застосуванням високопродуктивного безтраншейного способу укладання в ґрунт рулонної поліетиленової плівки, виникає потреба використання більш зручного способу з'єднання країв плівки, а саме склеювання. Однак відомо, що поліетилен, будучи неполярним полімером, не має достатньої адгезії до клеїв. У статті шляхом послідовного проведення теоретичних, експериментальних та натурних досліджень обґрунтовано можливість застосування операції склеювання поліетиленової плівки в окремих технологічних процесах гідротехнічного будівництва. За результатами теоретичних досліджень напружено-деформованого стану клейових швів внапусток тонких плівок, виготовлених з матеріалів, що підкоряються закону Гука, було встановлено, що використання клеїв з малим модулем пружності, забезпечує більш рівномірний розподіл дотичних напружень по ширині шва, порівняно з використанням клеїв з великим модулем пружності, що сприяє збільшенню міцності на розрив клейового шва плівок. Цей теоретично отриманий результат, який був прийнятий за гіпотезу, підтверджений експериментальними дослідженнями. Зразки поліетиленової плівки, з'єднані за допомогою клеїв, що мають різний модуль пружності, випробовували на розтягування на машині МР-05-1. Встановлено, що з використанням клеїв на каучуковій основі руйнування клейових швів плівок відбувалось в той момент, коли напрута розтягування в зразках поліетиленових плівок у всіх випадках перевищувала межу плинності поліетилену. За результатами натурних досліджень процесу безтраншейного укладання рулонної поліетиленової плівки при будівництві земляних протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами встановлено можливість з'єднання країв поліетиленової плівки за допомогою клею на основі наїрітового каучуку.

Ключові слова: клейовий шов, напружено-деформований стан, модуль пружності, нормальні та дотичні напруження, міцність на розтягування, поліетиленова плівка, протифільтраційна діафрагма, протипаводкова дамба.

Petrochenko O.V.

JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITY OF CONNECTING ROLLED POLYETHYLENE FILM WITH ADHESIVE SEAMS DURING THE CONSTRUCTION OF ANTI-FLOOD DAMS WITH DIAPHRAGMS

Polyethylene is the most common material of films used in hydraulic construction. In the process of construction of hydro technical structures, rolled polyethylene film, manufactured in factory conditions, is connected into continuous anti-filtration structures: screens, diaphragms, curtains. A reliable method of joining the edges of polyethylene film is welding. But in some cases, for example, during the construction of anti-flood dams with anti-filtration diaphragms using a high-performance trenchless method of laying rolled polyethylene film in the soil, there is a need to use a more convenient method of joining the edges of the film, namely gluing. However, it is known that polyethylene, being a non-polar polymer, does not have sufficient adhesion to adhesives. In the article, the possibility of using the operation of gluing polyethylene film in certain processes of hydraulic construction is substantiated by successively conducting theoretical, experimental and field studies. According to the results of theoretical studies of the stress-strain state of adhesive seams of thin films made of materials obeying Hooke's law, it was established that the use of adhesives with a small modulus of elasticity provides a more uniform distribution of tangential stresses across the seam, compared to the use of adhesives with a large modulus of elasticity, which helps to increase the tensile strength of the adhesive seam of the films. This theoretically obtained result was first accepted as a hypothesis, and then confirmed by experimental studies. Samples of polyethylene film, connected with the help of glues with different modulus of elasticity, were tested for stretching on the MP-05-1 machine. It was established that with the use of rubber-based adhesives, the destruction of the adhesive seams of the films occurred at the moment when the tensile stress in the samples of polyethylene films in all cases exceeded the yield point of polyethylene. According to the results of field studies of the process of trenchless laying of rolled polyethylene film during the construction of earthen anti-flood dams with anti-filtration diaphragms, the possibility of joining the edges of the polyethylene film using glue based on nairite rubber was established.

Key words: adhesive seam, stress-strain state, modulus of elasticity, normal and tangential stresses, tensile strength, polyethylene film, anti-filtration diaphragm, anti-flood dam.

УДК 624.016: 626 : 502/504

Петроченко О.В. Обґрунтування технологічної можливості з'єднання рулонної поліетиленової плівки клейовими швами при будівництві протипаводкових дамб з діафрагмами // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – Київ: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 370-380.

Проведено теоретичні дослідження напружено-деформованого стану клейових швів тонких плівок, що підкоряються закону Гука, а також експериментальні дослідження міцності клейових швів плівок, виготовлених з поліетилену, який не має достатньої адгезії до клеїв. Проведено натурні дослідження операції склеювання поліетиленової плівки в умовах будівництва протифільтраційних діафрагм. За результатами досліджень встановлено умови, за яких стає можливим з'єднання гіротехнічної поліетиленової плівки клейовими швами в окремих будівельних процесах, зокрема при безтраншеювому укладанні плівки під час будівництва протипаводкових дамб з протифільтраційними діафрагмами.

Табл. 1. Іл. 8. Бібліогр. 11 назв.

UDC 624.016: 626: 502/504

Petrochenko O.V. Justification of the technological possibility of connecting rolled polyethylene film with adhesive seams during the construction of flood dams with diaphragms // Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles. – Kyiv: KNUCA, 2024. – Issue 113. – P. 370-380.

Theoretical studies of the stress-strain state of adhesive joints of thin films obeying Hooke's law were carried out, as well as experimental studies of the strength of adhesive joints of films made of polyethylene, which does not have sufficient adhesion to adhesives. Full-scale studies of the operation of gluing polyethylene film under the conditions of construction of anti-filtration diaphragms were conducted. According to the results of research, the conditions under which it becomes possible to connect hydro technical polyethylene film with adhesive seams in separate construction processes, in particular, when laying the film without trenches during the construction of anti-flood dams with anti-filtration diaphragms.

Table 1. Fig. 8. Ref. 11.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): канд. техн. наук, начальник відділу з організації корпоративного управління НАУ Петроченко Олександр Вячеславович

Адреса робоча: проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна, Національний авіаційний університет

Мобільний тел.: +38(063) 560-66-73

E-mail: a_petr89@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2184-4811>