

Исследование технологических характеристик элемента трубошпунтовой завесы и самозабуриваемых анкеров из полимерных композиционных материалов

М.Ю. Бамборин, канд. техн. наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»

Современные неметаллические материалы нашли применение в различных отраслях промышленности, в том числе строительстве объектов долгосрочной изоляции опасных отходов. Применение полимерных и композиционных материалов в таких изделиях, как: шпунты, сваи – позволило заменить классические металлические шпунты и сваи при возведении сложных гидротехнических сооружений, объектов специального назначения, а также в промышленном и гражданском строительстве.

Сооружения, на которых применяются шпунты и сваи (шпунтовые), можно разделить на два типа:

1) ограждения постоянного типа (стенки берегоукрепления гидротехнических сооружений (водохранилищ, больверк портов речных и морских, антропогенных островов), устройства подпорных стен (часть элементов в комплексе укрепления оползневых склонов), выправительные сооружения (укрепление участков, подверженных паводкам и наводнениям), береговые опорные сооружения мостов (шпунтовые сваи-опоры);

2) ограждения временного типа (ограждающие конструкции котлованов зданий, сооружений, тоннелей и иных строительных объектов, производимых открытым способом, опорные сооружения мостов и гидротехнических сооружений).

Конструкции из шпунтов на основе полимерных композиционных материалов разрабатывались с учётом применения в различных климатических условиях (умеренный и полярный), в сейсмически активных условиях (до 9 баллов) и агрессивных средах в соответствии с классификацией.

Обсуждение результатов

Главными параметрами при устройстве вертикальных барьеров (противофильтрационных завес), определяющими эффективность изоляции стены в грунте из трубного шпунта, являются деформативность и изгибающий момент шпунта. На данные показатели влияет комплекс геометрических и прочностных параметров: расчетных схем работы, глубины котлована, грунтовых условий и дополнительных

Исследование технологических характеристик элемента трубошпунтовой завесы и самозабуриваемых анкеров из полимерных композиционных материалов

М.Ю. Бамборин, канд. техн. наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», e-mail mybamborin@noraо.ru

Аннотация: Применение высокотехнологических полимерных композиционных материалов в строительстве позволяет вести работы в условиях ограничений объектов транспортной инфраструктуры, ограниченного пространства строительной площадки или в сложных условиях эксплуатации. В работе представлены результаты исследований технологических характеристик элемента трубошпунтовой завесы из углепластика и стеклопластика, самозабуривающегося анкера из стеклопластика и стали, применяемых в современном строительстве.

Ключевые слова: трубошпунт, анкер, углепластик, стеклопластик, толщина намотки, прочность трубошпунта, прочность анкера, жесткость стенки, прогиб трубы, GFRP

Study of technological characteristics of a pipe curtain element and self-drilling anchors from poly-dimension composite materials

Mikhail Yurievich Bamborin, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE

Abstract: The use of high-tech polymer composite materials in construction makes it possible to carry out work under the constraints of transport infrastructure, limited space at a construction site, or in difficult operating conditions. The paper presents the results of studies of the technological characteristics of a pipe-and-pile curtain element made of carbon fiber and fiberglass, a self-drilling anchor made of fiberglass and steel used in modern construction.

Keywords: pipe pile, anchor, carbon fiber reinforced plastic, fiberglass, winding thickness, pipe pile strength, anchor strength, wall rigidity, pipe deflection, GFRP

Таблица 1 Показатели трубчатого шпунта

D, мм	Толщина намотки стенки 8 мм			Толщина намотки стенки 15 мм		
	Увеличение веса		Рост показателя жесткости	Увеличение веса		Рост показателя жесткости
	%	кг/п-м	МПа·м ²	%	кг/п-м	МПа·м ²
Углепластиковая труба, увеличение D с шагом 100 мм						
200–500	52–26	8,7–22,2	1,4–22,8	54–26	24,2–41,1	2,3–41
600–800	20–14	15,8–35,8	40–95	21–15	49,6–66,6	72–174
Стеклопластиковая труба, увеличение D с шагом 100 мм						
200–500	52–26	9,4–24,1	40–95	54–26	17–44,5	1–17
600–800	20–14	2,9–38,8	16–39	21–15	53,7–72,1	29,5–71

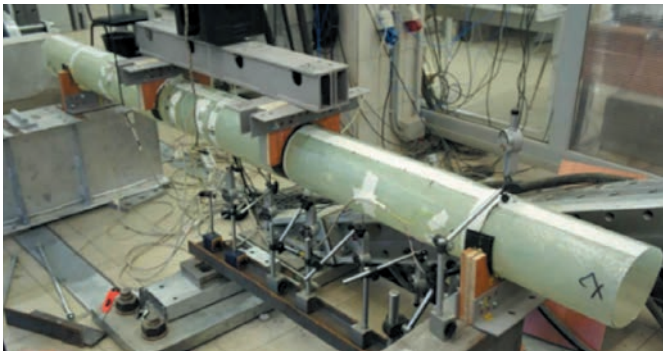


Рис. 1 Трубошпунт производства АО «НИИграфит» на испытательном стенде предела прочности при изгибе [1]

ные физико-механические показатели штанг самозабуриваемых анкеров из стали и стеклопластика.

Данные таблицы на рис. 3, а, б показывают зависимость показателей элемента трубчатого шпунта, а именно жесткости стенки, прогиба, изгибающего момента трубы от диаметра трубы, динамика изменения демонстрирует идентичный механизм у трубы как из углепластика, так и из стеклопластика, вне зависимости от диаметра.

Увеличение диаметра углепластиковой трубы с шагом 100 мм приводит к увеличению веса при толщине намотки стенки 8 мм:

– при $\varnothing 200\text{--}500$ мм (от 52 до 26% за каждый шаг) – с 8,7 до 22,2 кг/п-м и росту показателя жесткости EJ с 1,4 до 22,8 МПа·м²;

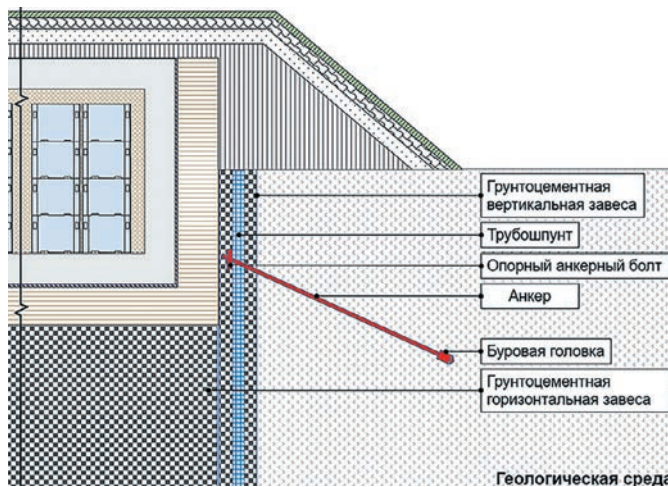


Рис. 2 Общий вид трубошпунтовой противодиффузионной завесы с анкерным усилением подпорной конструкции

технических решений, повышающих устойчивость стены к боковому давлению.

Для определения оптимальных технологических параметров производства вертикального барьера (противодиффузионной завесы) из трубошпунта (рис. 1) с усилением подпорной конструкции анкерами (рис. 2) был произведен анализ параметров, влияющих на эффективность барьера. Расчёты производились на трубах из углепластика, стеклопластика с учётом разных диаметров труб шпунта (от 200 до 800 мм), толщины стенки (8, 15 мм) и штангах анкера с учётом разных диаметров (от 30 до 103 мм), толщины стенки (от 6 до 26 мм). В табл. 1 приведены некоторые наиболее явные показатели элементов трубчатого шпунта из углепластика и стеклопластика, в табл. 2 представлены максималь-

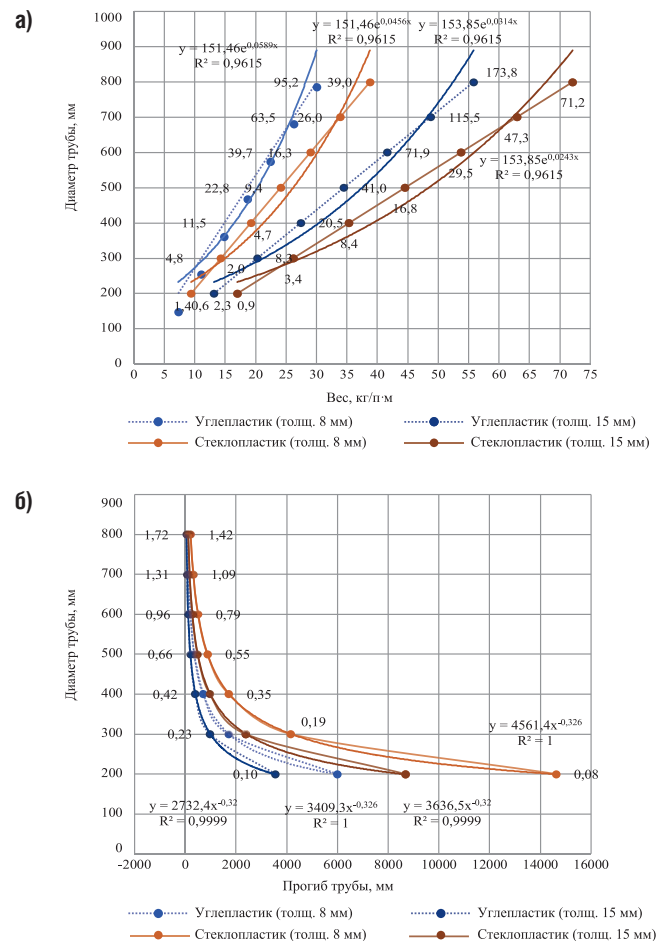


Рис. 3 Зависимости диаметра трубы: а - от веса трубы и жесткости её стенки; б - от прогиба трубы, изгибающего момента и момента сопротивления трубы

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 20 до 14% за каждый шаг) – с 15,8 до 35,8 кг/п·м и EJ с ~ 40 до 95 МПа·м².

При толщине намотки стенки 15 мм увеличение массы труб составляет:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 54 до 26%) – с 24,2 до 41,1 кг/п·м и EJ с 2,3 до 41 МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 21 до 15%) – с 49,6 до 66,6 кг/п·м и EJ с ~ 72 до 174 МПа·м².

Увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм у стеклопластиковой трубы приводит к увеличению веса при толщине намотки 8 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 52 до 26%) – с 9,4 до 24,1 кг/п·м и EJ с $\sim 0,6$ до $\sim 9,5$ МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 20 до 14%) – с 29 до 38,8 кг/п·м и EJ с ~ 16 до 39 МПа·м²;

при толщине стенки 15 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 54 до 26%) – с 17 до 44,5 кг/п·м и EJ с ~ 1 до 17 МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 21 до 15%) – с 53,7 до 72,1 кг/п·м и EJ с 29,5 до 71 МПа·м².

Увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм у углепластиковой трубы приводит к увеличению веса при толщине намотки стенки 8 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 52 до 26% за каждый шаг) – с 8,7 до 22,2 кг/п·м и росту показателя жёсткости EJ с 1,4 до 22,8 МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 20 до 14% за каждый шаг) – с 15,8 до 35,8 кг/п·м и EJ с ~ 40 до 95 МПа·м².

При толщине намотки стенки 15 мм увеличение массы труб составляет:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 54 до 26%) – с 24,2 до 41,1 кг/п·м и EJ с 2,3 до 41 МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 21 до 15%) – с 49,6 до 66,6 кг/п·м и EJ с ~ 72 до 174 МПа·м².

Увеличение диаметра трубы с шагом 100 мм у стеклопластиковой трубы приводит к увеличению веса при толщине намотки 8 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 52 до 26%) – с 9,4 до 24,1 кг/п·м и EJ с $\sim 0,6$ до $\sim 9,5$ МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 20 до 14%) – с 29 до 38,8 кг/п·м и EJ с ~ 16 до 39 МПа·м²;

при толщине стенки 15 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм (от 54 до 26%) – с 17 до 44,5 кг/п·м и EJ с ~ 1 до 17 МПа·м²;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм (от 21 до 15%) – с 53,7 до 72,1 кг/п·м и EJ с 29,5 до 71 МПа·м².

Также с увеличением диаметра и жёсткости трубы происходит снижение прогиба и рост изгибающего момента с увеличением момента сопротивления трубы.

У углепластиковой трубы при толщине намотки 8 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм происходит снижение прогиба в ~ 18 раз – с ~ 6 м до 0,35 м и увеличение изгибающего момента (от 60 до 135%) – с 0,1 до 0,66 МН·м;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм динамика изменения показателя прогиба демонстрирует более умеренные показатели и снижается в $\sim 2,5$ раза – с 0,2 м до 85 мм, это приводит к росту изгибающего момента (от 30 до 45%) – с 0,96 до 1,72 МН·м.

Увеличение толщины намотки до 15 мм приводит к снижению показателя прогиба у трубы:

– при $\phi 200$ мм до 3,5 м, что в 1,7 раза меньше, чем у трубы аналогичного диаметра с толщиной стенки 8 мм. При увеличении диаметра от $\phi 200$ до 500 мм показатель прогиба трубы изменяется в 18 раз – с 3,5 м до $\sim 0,2$ м, изгибающий момент (от 60 до 143%) – с 0,17 до 1,19 МН·м;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм показатели так же, как и у труб с толщиной стенки 8 мм, демонстрируют умеренное снижение прогиба – от 113 мм до 46 мм (изменение составляет от 32 до 46%), изгибающий момент – с 1,74 до 3,15 МН·м.

У стеклопластиковой трубы изменения такие же, как и у углепластиковой, но, так как модуль упругости у стеклопластика (25000 МПа) в 2,4 раза меньше, чем у углепластика (61000 МПа), показатели прогиба трубы выше практически в три раза, показатель изгибающего момента меньше в среднем на 25%.

У трубы при толщине намотки 8 мм:

– при $\phi 200\text{--}500$ мм показатель прогиба трубы изменяется в 16,8 раз – с $\sim 14,6$ до $\sim 0,9$ м, изгибающий момент увеличивается с 0,8 до 0,55 МН·м;

– при $\phi 600\text{--}800$ мм прогиб трубы снижается более чем в 2 раза – с 0,5 до 0,2 м, изгибающий момент симбатно увеличивается в ~ 2 раза – с 0,79 до 1,42 МН·м.

Увеличение толщины намотки до 15 мм позволяет снизить показатель прогиба у трубы $\phi 200$ чуть больше, чем в 1,5 раза по сравнению с трубой $\phi 200$ со стенкой 8 мм – до 8,7 м. При увеличении диаметра от $\phi 200$ до 500 мм показатель прогиба трубы изменяется с 8,7 м до $\sim 0,5$ м, изгибающий момент с 0,14 до 0,98 МН·м, у $\phi 600\text{--}800$ мм показатели демонстрируют сдержанное изменение прогиба от 276 до 114 мм, изгибающий момент с 1,44 до 2,60 МН·м.

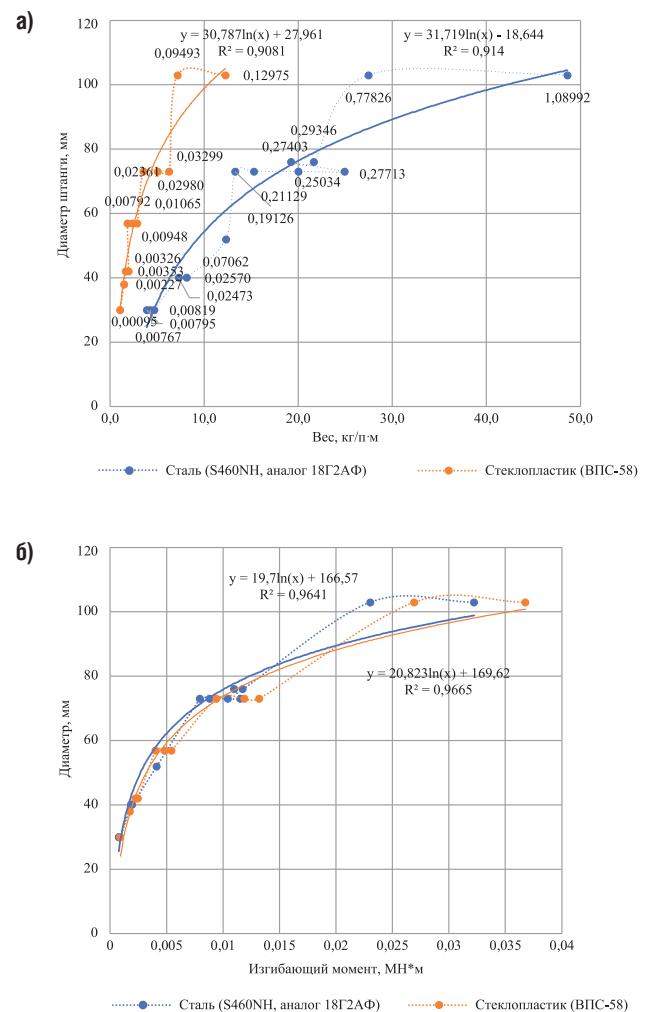


Рис. 4 Графики взаимосвязи: а – веса штанги анкера и ее диаметра; б – диаметра и изгибающего момента штанги анкера

Таблица 2 Показатели штанги

Тип штанги	Нагрузка на пределе текучести P_T , кН	Площадь сечения A_s , м ²	Прочность на растяжение, МПа	Вес m , кг/п.м	Жесткость стенки EJ , МПа·м ²	Изгибающий момент M , МН·м
Стальная штанга						
40x12	525	0,001	124	8,2	0,0257	0,0019
103x12,5	1800	0,035	127	27,5	0,7782	0,0230
76x14,5	1500	0,0028	134	21,6	0,2934	0,0117
Стеклопластиковая штанга						
57x8	727	0,0012	148	2,4	0,0095	0,0048
38x8	4905	0,0008	149	1,5	0,0023	0,0017
57x6	576	0,0009	150	1,9	0,0079	0,0041

Данные, представленные в табл. 2 и на рис. 4, а, демонстрируют влияние площади сечения штанги на нагрузку на пределе текучести и пределе прочности. Как видно из представленных данных, штанги из стеклопластика практически идентичны по характеристикам стальным штангам, несмотря на отличие в плотности (сталь 7,73 г/см³, стеклопластик 1,95 г/см³) и модуле упругости (сталь 210000 МПа, стеклопластик 25000 МПа) [2, 3].

У стальной штанги одновременно с увеличением внешнего диаметра с 30 до 103 мм увеличиваются номинальная площадь сечения (с 0,0005 до 0,0062 м²), предел прочности материала при растяжении (с 89 до 134 МПа) и показатель нагрузки на пределе текучести (с 180 до 2730 кН), но максимальными показателями предела прочности при растяжении обладают штанги типа:

- 40x12 ($P_T = 525$ кН, $A_s = 0,001$ м², $\sigma_{раст} = 124$ МПа);
- 103x12,5 ($P_T = 1800$ кН, $A_s = 0,0035$ м², $\sigma_{раст} = 127$ МПа);
- 76x14,5 ($P_T = 1500$ кН, $A_s = 0,0028$ м², $\sigma_{раст} = 134$ МПа).

У стеклопластиковой штанги динамика зависимостей аналогична стальной, одновременно с увеличением номинальной площади сечения (с 0,0005 до 0,0062 м²) увеличиваются предел прочности материала при растяжении (с 106 до 150 МПа) и показатель нагрузки на пределе текучести (с 260 до 2670 кН).

Штанги из стеклопластика обладают более высокими показателями предела прочности при растяжении по сравнению со стальными штангами, максимальными показателями обладают штанги типа:

- 57x8 ($P_T = 727$ кН, $A_s = 0,0012$ м², $\sigma_{раст} = 148$ МПа);
- 38x8 ($P_T = 490$ кН, $A_s = 0,0008$ м², $\sigma_{раст} = 149$ МПа);
- 57x6 ($P_T = 576$ кН, $A_s = 0,0009$ м², $\sigma_{раст} = 150$ МПа).

Данные, представленные в табл. 2 и на рис. 3, а и б, демонстрируют влияние диаметра штанги анкера на вес, жесткость стенки штанги и изгибающий момент в момент сопротивления.

У стальной штанги увеличение диаметра с 30 до 103 мм приводит к увеличению веса с 3,9 до 48,6 кг/п.м, жесткости стенки с 0,0076 до 1,0899 МПа·м², изгибающего момента с 0,0008 до 0,0322 МН·м. Штанги с высокими показателями предела прочности при растяжении обладают следующими характеристиками:

- 40x12 ($m=8,2$ кг/п.м, $EJ=0,0257$ МПа·м², $M=0,0019$ МН·м);
- 103x12,5 ($m=27,5$ кг/п.м, $EJ=0,7782$ МПа·м², $M=0,0230$ МН·м);

– 76x14,5 ($m=21,6$ кг/п.м, $EJ=0,2934$ МПа·м², $M=0,0117$ МН·м).

У стеклопластиковой штанги увеличение диаметра с 30 до 103 мм приводит к увеличению веса с 1,1 до 12,3 кг/п.м, жесткости стенки с 0,0009 до 0,1297 МПа·м², изгибающего момента с 0,0009 до 0,0367 МН·м. Ранее выделенные стеклопластиковые штанги с максимальными показателями предела прочности при растяжении обладают следующими характеристиками:

- 57x8 ($m=2,4$ кг/п.м, $EJ=0,0095$ МПа·м², $M=0,0048$ МН·м);
- 38x8 ($m=1,5$ кг/п.м, $EJ=0,0023$ МПа·м², $M=0,0017$ МН·м);
- 57x6 ($m=1,9$ кг/п.м, $EJ=0,0079$ МПа·м², $M=0,0041$ МН·м).

Заключение

Основные достоинства полимерных трубошпунтов: малый вес, малые эксплуатационные затраты, высокая степень изоляции объекта, стойкость к агрессивным средам, внешний вид лучше, чем у стального шпунта и ж/б стены в грунте.

Материал трубного шпунта должен отвечать следующим требованиям:

- предел прочности (текучести) на растяжение $Rt0,95$ – не менее 166 МПа,
- предел прочности (текучести) на изгиб $Rt0,95$ – не менее 200 МПа,
- модуль упругости E – не менее 25 ГПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Разработка технологии устройства противодиффузионных завес в агрессивных средах / Презентация Руководителя проекта отдела строительных проектов // В.Я. Шишкин. – АО «НИИГрафит», 20 л.
2. Каталог продукции (буриинъекционные анкерные системы) <https://www.supfrp.com/item/supfrp-gfrp-reinforcement-systems/supfrp-gfrp-sda-bolt>.
3. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // Научно-технический журнал «ТРУДЫ ВИАМ». 2021. №3. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-128-136.