

УДК 69:001.89;624. 191.3; 621. 69:51-7

Галинский Александр Михайлович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор

*Государственное предприятие " Научно-исследовательский институт строительного производства" (НИИСП), Киев***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО–ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКРАНА**

Аннотация. В Научно-исследовательском институте строительного производства (НИИСП) ведутся исследования технологии устройства горизонтальных противofильтрационных экранов (ГПЭ) под существующими сооружениями с использованием метода горизонтально-направленного бурения скважин. Для разработки математической модели устройства ГПЭ проведен комплекс экспериментов на крупномасштабном стенде. Установлено влияние технологических факторов: вертикального давления, давления подачи и плотности раствора на тяговое усилие перемещения рабочего органа, необходимого для создания экрана. Получена математическая модель, описывающая процесс устройства ГПЭ, представленная в виде балансного уравнения по определению тягового усилия, учитывающего вибрационную и реактивную составляющие, возникающие при выходе раствора под давлением из форсунок рабочего органа в горизонтальную полость. Получены оценочные уравнения для определения величины вибрационной составляющей тягового усилия как функции двух переменных – давления подачи раствора и его плотности.

Ключевые слова: технология; эксперимент; горизонтальный экран; математическая модель; тяговое усилие

Постановка проблемы

Одной из задач защиты окружающей среды является задача защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения токсичными стоками, а также стоками с радионуклидами. Проблема локализации таких стоков может решаться различными методами, среди которых технология устройства замкнутой совершенной противofильтрационной завесы способом "стена в грунте" является достаточно надежной. Однако эффективность такой вертикальной завесы значительно снижается в случае отсутствия на практически достигаемой глубине водоупорного слоя грунта, в который должна быть заглублена завеса. При отсутствии водоупора проблему можно решить, применяя новую технологию устройства горизонтального экрана под существующими сооружениями. Для создания новой технологии необходимо решить задачу построения математической модели устройства горизонтального экрана с использованием экспериментально-теоретического метода.

**Анализ исследований
и публикаций**

Анализ работ М.И. Смородинова, А.Л. Филахтова, В.М. Зубкова, Н.Н. Круглицкого, А.М. Чернухина, исследований НИИОСП им. Н.М. Герсеванова (г. Москва) и НИИСП (г. Киев), [1 – 6] показал необходимость совершенствования методов локализации загрязненных грунтов и грунтовых вод при отсутствии на достигаемой глубине водоупора.

Исследования, проведенные в НИИСП, показали возможность создания горизонтального противofильтрационного экрана для локализации загрязнений и необходимость определения влияния различных факторов на процесс образования горизонтальной полости под действием вертикального давления и устройства в ней экрана.

Анализ работ Ю.А. Ветрова, В.П. Горячкина и А.Н. Зеленина [7 – 9] показал направления исследования влияния формы рабочего органа и свойств грунта на процесс образования горизонтальной полости для устройства противofильтрационного экрана.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Одной из задач создания технологии устройства горизонтального противодиффузионного экрана под сооружением является разработка математической модели процесса образования экрана на базе известных зависимостей с использованием теоретических методов и экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях.

Цель работы

На основании исследований на крупномасштабном стенде установить эмпирические зависимости усилий перемещения рабочего органа в сыпучей среде от вертикального давления, давления подачи раствора, плотности раствора и свойств среды, а также получить значения коэффициентов, учитывающих свойства среды и форму рабочего органа для уточнения математической модели процесса устройства горизонтального экрана.

Основное содержание

Новая технология устройства горизонтального противодиффузионного экрана (ГПЭ) [10] для защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения базируется на технологии устройства горизонтальных скважин методом горизонтально-направленного бурения (ГНБ)

Основными процессами технологии являются: бурение направляющих горизонтальных скважин, затягивание в скважины разделительных элементов (РЭ) из полимерных труб, разработка грунта между скважинами с разделительными элементами грунторазрабатывающим рабочим органом и заполнение образовавшейся горизонтальной полости противодиффузионным материалом (ПФМ) (рис. 1).

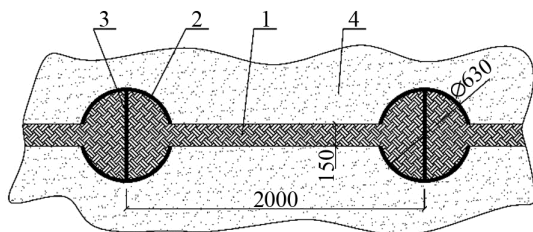


Рисунок 1 – Фрагмент ГПЭ:
1–горизонтальная полость, заполненная ПФМ;
2– горизонтальная скважина с РЭ;
3 – перегородка РЭ; 4 – грунт

Процесс образования горизонтальных полостей в грунте под сооружением и заполнение полостей ПФМ изучен не достаточно глубоко. Поэтому на

протяжении ряда лет проводятся исследования технологических параметров устройства горизонтальных экранов под сооружениями. Эти исследования направлены на решение задач: по оценке влияния вертикального давления на усилие перемещения рабочего органа в песках и на формирование горизонтального экрана из твердеющего материала или полимерной пленки; по подбору составов твердеющих ПФМ; по оценке способов подачи ПФМ в горизонтальную полость и т.д. [11].

Для реализации предложенной технологии, кроме вышеупомянутых задач, необходимо решить не менее важную задачу по созданию математической модели, описывающей процесс устройства ГПЭ под сооружением.

В работе [12] было отмечено, что для построения математической модели процесса устройства ГПЭ в сыпучей песчаной среде необходимо применять экспериментально-теоретический метод исследования, так как значения физико-механических характеристик сыпучей среды, которые входят в расчетные формулы, наиболее точно могут быть определены экспериментальным путем. В этой же работе была предложена в качестве базовой модели формула (1) для определения силы F сопротивления перемещению рабочего органа:

$$F = S \left(a_0 + \sum_{i=1}^n a_i V^i + \sum_{j=1}^k b_j \dot{V}^j \right), \quad (1)$$

где S – площадь миделя, m^2 ; a_i, b_j – коэффициенты, характеризующие свойства среды и форму рабочего органа; V – скорость перемещения рабочего органа, m/c ; \dot{V} – ускорение рабочего органа, m/c^2 .

С учетом того, что скорость перемещения рабочего органа в грунте при устройстве горизонтального экрана мала (10-12 м/час), и при таких скоростях преобладают упругие деформации, то в работе [13] для расчета необходимых усилий была предложена упрощенная формула (2), которая позволяет учитывать процессы, протекающие в системе "твердое тело – сыпучая среда":

$$N = (B \cdot \rho_{po} \cdot V^2 + P_{верт}), \quad (2)$$

где $N = F/S$ – удельное усилие перемещения рабочего органа в песчаной среде, Па; B – коэффициент, учитывающий свойства среды и форму рабочего органа; ρ_{po} – плотность материала рабочего органа, kg/m^3 , $P_{верт}$ – вертикальное давление, Па.

Для изучения возможности образования горизонтального экрана в песчаном грунте в условиях воздействия вертикальной нагрузки, уточнения математической модели, описывающей

процесс устройства ГПЭ, получения эмпирическим путем значений коэффициента B и удельного сопротивления N , в НИИСП была проведена серия экспериментов [11] на специальной приставке к серийному сдвиговому прибору ПСГ-2М (рис. 2).

Обработка результатов эксперимента методами математической статистики позволила получить эмпирические зависимости удельного сопротивления перемещению рабочего органа N и коэффициента B , учитывающего свойства среды и форму рабочего органа, от вертикального давления и степени уплотнения песка для рабочих органов с клиновидной и радиальной формой режущего ножа.

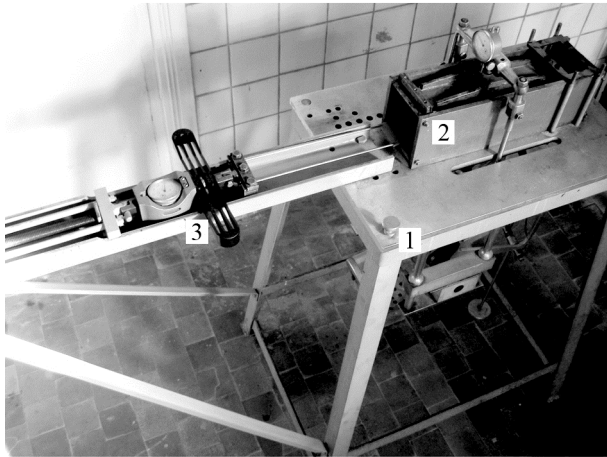


Рисунок 2 – Приставка к сдвиговому прибору ПСГ-2М:
1 – сдвиговой прибор; 2 – приставка;
3 – динамометр ДОРМ-3-0,5

Экспериментами также установлено, что рабочий орган в виде ножа с радиальной заточкой легче стабилизируется и является оптимальным для образования полости (особенно при увеличении плотности песчаной среды) и поэтому нож такой формы может быть рекомендован для дальнейших исследований.

Тем не менее, исследования показали, что зона уплотнения ограничена размерами грузового отсека приставки (340x100x110 мм) и, вероятно, значительно превосходит его размеры, из чего следует, что процесс уплотнения песка, протекающий при проведении экспериментов, отличается от реальных условий, в которых среда представляется как бесконечный объем. Поэтому, значения коэффициента B , учитывающего влияние среды и форму рабочего органа и соответственно удельного усилия перемещению рабочего органа N в песчаной среде требуют уточнения на модели значительно большего масштаба.

Для моделирования технологии устройства ГПЭ с учетом влияния различных факторов был создан крупномасштабный стенд, позволяющий в условиях, приближенных к реальным, практически отработать основные процессы по созданию ГПЭ.

Основными элементами стенда для моделирования технологии устройства ГПЭ являются: бункер для грунта (песка); крышка с прорезиненным днищем (пневмопригруз) для моделирования избыточного вертикального давления на грунт нагнетанием в нее компрессором воздуха; трубы, моделирующие горизонтальные скважины с РЭ; гидравлическая система подачи ПФМ; привод перемещения рабочего органа; рабочий орган с радиальной формой режущего элемента; полые тяги для соединения рабочих органов с приводом (рис. 3, табл. 1)

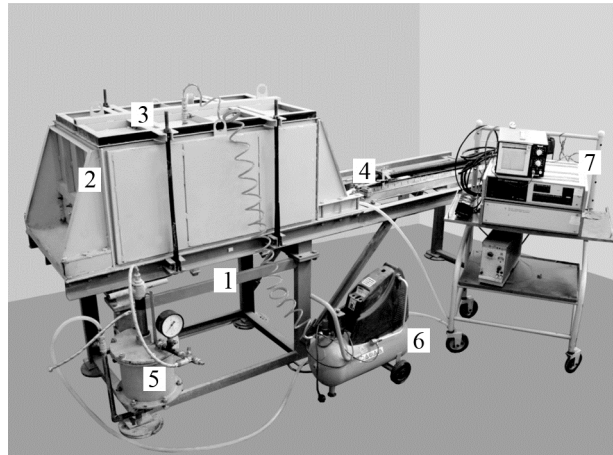


Рисунок 3 – Стенд моделирования технологии устройства горизонтального экрана:
1 – стол с опорой; 2 – бункер; 3 – прижимная крышка (пневмопригруз); 4 – каретка привода перемещения рабочего органа; 5 – гидравлическая система подачи ПФМ; 6 – компрессор; 7 – измерительная система

С учетом того, что на приставке было отмечена неэффективность подачи ПФМ в горизонтальную полость со стороны ее устья, для стенда были созданы рабочие органы в виде ножа с радиальной заточкой и с форсунками для подачи ПФМ непосредственно за рабочий орган по мере его перемещения.

Эксперименты, проведенные на крупномасштабном стенде, можно разделить на две серии:

1-я серия – эксперименты без прокладывания ГПЭ, которые проводились с целью определения на стенде тягового усилия перемещения рабочего органа в песке “насухо” без прокладывания экрана и уточнения значения коэффициента B ;

2-я серия – эксперименты с прокладыванием ГПЭ для определения влияния технологических факторов на процесс образования экрана, на величину тягового усилия и удельного сопротивления перемещению рабочего органа в песке при образовании ГПЭ, на качество экрана.

В 1-й серии определение удельного усилия перемещению рабочего органа N в песчаной среде, и, соответственно, значения коэффициента B ,

учитывающего влияние среды и форму рабочего органа, проводилось при протягивании рабочего органа в бункере стенда, заполненного предварительно уплотненным песком. Степень уплотнения песка – 0,8, что соответствовало в среднем плотности 1,65 г/см³. Вертикальное давление на рабочий орган, создаваемое песком и пневмопригрузом, составляло 0,4 и 0,8 атм. Усилия, необходимые для перемещения рабочего органа, измерялись динамометром ДОРМ-3-0,5 и тензометрической измерительной системой СИИТ-3. Результаты первой серии экспериментов сведены в табл. 2.

Значение B определялось с учетом выражения по формуле:

$$B = \frac{N_{\text{сух}} - P_{\text{верт}}}{\rho_{\text{по}} v^2}, \quad (3)$$

Таблица 1 – Технические характеристики лабораторного стенда и вспомогательного оборудования

№ п/п	Названия узлов стенда	К-во	Характеристика	Ед. изм.	Величина
1	Стенд	1	Длина	м	3,35
			Ширина	м	0,8
			Высота	м	1,39
			Масса	кг	550,0
2	Бункер	1	Длина	м	1,0
			Ширина	м	0,64
			Высота	м	0,49
3	Крышка - пневмопригруз	1	Давление	МПа	0,1
			Ёмкость	м ³	0,04
4	Трубы-ограничители	4	Длина	м	1,03
			Диаметр	мм	60,0
5	Рабочий орган	3	Длина	мм	155,0
			Ширина	мм	35,0
			Высота	мм	20,0
			Площадь лобового сопротивления	см ²	28,76
6	Мотор-редуктор 4МП-25-28,5	1	Мощность	кВт	0,18
7	Каретка	1	Скорость перемещения	см/с	0,33
8	Гидросистема	1	Ёмкость	см ³	5600
			Давление	МПа	до 0,3
9	Компрессор АВАС 24 Нр-2	1	Производительность	м ³ /мин	0,5
			Давление	МПа	0,4
10	Система измерительная СИИТ-3	1			

Таблица 2 – Результаты определения тягового усилия ($F_{\text{сух}}$) и удельного сопротивления перемещению рабочего органа ($N_{\text{сух}}$) в песке без образования экрана

Р _{верт} = 0,4 * 9,81 * 10 ⁴ Па										Среднее
F _{сух} , Н	1368,25	1385,55	1411,20	1439,87	1461,50	1490,21	1521,36	1540,48	1570,89	1465,48
N _{сух} * 10 ⁴ , Па	47,57	48,18	49,07	50,07	50,82	51,82	52,90	53,56	54,62	50,96
Р _{верт} = 0,8 * 9,81 * 10 ⁴ Па										Среднее
F _{сух} , Н	1898,18	1980,14	2070,33	2192,00	2322,55	2407,20	2487,12	2629,33	2686,24	2297,01
N _{сух} * 10 ⁴ , Па	66,00	68,85	71,99	76,22	80,76	83,70	86,48	91,42	93,40	79,87

Таблиця 3 – Результати определения значений В

№ п/п	Оборудование	$\rho_{пв}$, кг/м ³	$V \cdot 10^{-2}$, м/с	$P_{верт} \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{Па}$						$B_{0,8}/B_{0,4}$
				0,4			0,8			
				$N_{сух} \cdot 10^4$, Па	$B \cdot 10^6$	B_{np}/B_{cm}	$N_{сух} \cdot 10^4$, Па	$B \cdot 10^6$	B_{np}/B_{cm}	
1	Приставка	7800	0,33	303,5	35,27	6,37	481,5	55,76	6,58	1,58
2	Стенд			50,96	5,54		79,87	8,48		1,53

Также установлено, что значения удельного сопротивления перемещению рабочего органа и, соответственно, коэффициента В, учитывающего влияние среды и форму рабочего органа, в экспериментах на стенде практически в 6 раз меньше тех же показателей, полученных на приставке. Это объясняется тем, что в экспериментах на приставке зона уплотнения песка при перемещении рабочего органа была ограничена размерами контейнера, что принципиально отличается от реальных условий, при которых среда представляется как бесконечный объем, в то время как эксперименты на крупномасштабном стенде значительно ближе к реальным условиям.

Основная цель второй серии экспериментов состояла в корректировке выбранной оценочной модели [13] за счет учета дополнительных усилий, обусловленных технологическими особенностями образования ГПЭ и конструктивными особенностями рабочего органа.

Исходя из этого, вторая серия проводилась при тех же значениях основных параметров, что и первая, но для различных значений вертикального давления, давления подачи и плотности подаваемого раствора. Именно эти параметры влияют как на величину реактивной силы и величину вибрации рабочего органа, которые возникают при выходе раствора из его форсунок, так и на изменение влажности песчаной среды, и могут контролироваться в процессе проведения испытаний.

В процессе создания экрана моделировалось вертикальное давление, составляющими которого были давление песка, находящегося в бункере, и дополнительное давление создаваемое пневмопригрузом. Вертикальное давление изменялось от 0,04 до 0,8 кг/см².

Экран состоял из трех параллельных полос, образуемых между ограничителями рабочим органом с форсунами, через которые в полость за рабочим органом по тяговым раствороподводящим трубам подавался раствор ПФМ плотностью от 1,2 до 1,35 г/см³. Давление подачи раствора варьировалось от 0,7 до 1атм.

Для оценки влияния вышеуказанных факторов на возможность создания горизонтального экрана и его качество был использован метод планирования

эксперимента с проведением исследований по 15-ти точечному симметричному плану с определением функций отклика и последующим составлением уравнений регрессии.

В качестве одной из функций отклика было выбрано удельное сопротивление перемещению рабочего органа N_3 , рассчитанное по результатам определения тягового усилия F_3 (табл.4).

Таблиця 4 – Результаты определения средних значений тягового усилия и удельного сопротивления перемещению рабочего органа при образовании экрана

$P_{верт} = 9,81 \cdot 10^4 \text{Па}$	$F_3, \text{Н}$	$N_3 \cdot 10^4, \text{Па}$	$F_3, \text{Н}$	$N_3 \cdot 10^4, \text{Па}$	$F_3, \text{Н}$	$N_3 \cdot 10^4, \text{Па}$
	$\rho_{р-ра} \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$					
	1,2		1,28		1,35	
$P_{под} = 0,7 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{Па}$						
0,8	2085,29	72,51	1984,96	69,02	1900,62	66,09
0,4	1299,26	45,18	1233,08	42,87	1202,73	41,82
0,04	618,48	21,50	587,37	20,42	572,66	19,91
$P_{под} = 0,85 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{Па}$						
0,8	1989,15	69,16	1869,44	65,00	1781,75	61,95
0,4	1278,84	44,47	1193,88	41,51	1144,77	39,80
0,04	608,74	21,17	568,66	19,77	515,95	17,94
$P_{под} = 1,0 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{Па}$						
0,8	1866,59	64,90	1744,04	60,64	1676,81	58,30
0,4	1244,38	43,27	1160,78	40,36	1099,07	38,22
0,04	590,92	20,55	552,35	19,21	523,63	18,21

Как показали исследования, при вертикальном давлении на экран 0,04 атм., давлении подачи раствора 0,7-1 атм. и плотности раствора 1,2–1,35 г/см³ экран практически не получался, а при других вариациях факторов имел достаточно качественную структуру. Поэтому, для уточнения математической модели, описывающей процесс устройства ГПЭ, в дальнейших исследованиях были использованы результаты экспериментов при вертикальных давлениях 0,4 и 0,8 атм.

В конструкции рабочего органа предусмотрены форсунки на его задней стенке для выхода раствора в полость, образуемую за рабочим органом. При выходе раствора ПФМ под давлением через форсунки возникает реактивная сила и, поэтому усилие, необходимое для устройства экрана (F_3) в песке, можно описать следующим общим балансным соотношением:

$$F_3 = F_{п} - F_{р}, \tag{5}$$

где $F_{п}$ – усилие для образования полости в песке, Н; $F_{р}$ – реактивная сила, Н.

Используя соотношение Мещерского для реактивной тяги при воздействии дополнительной внешней силы, уравнение для определения тягового усилия будет иметь вид:

$$F = S \left(B \rho_n v^2 + P_e \right) - \sqrt{2 P_{\text{под}} \rho_{p-pa}} \cdot \frac{m}{t} = \quad (6)$$

$$= S \left(B \rho_n v^2 + P_e \right) - \sqrt{2 P_{\text{под}} \rho_{p-pa}} \cdot \frac{V}{t},$$

$$F_p = \sqrt{2 P_{\text{под}} \rho_{p-pa}} \cdot \frac{V}{t}, \quad (7)$$

где $P_{\text{под}}$ – давление подачи раствора, Па; ρ_{p-pa} – плотность раствора, кг/м³; V/t – объем поданного раствора за единицу времени, м³/с.

Результаты расчета реактивной составляющей тягового усилия при образовании экрана при вертикальных давлениях 0,4 и 0,8 атм. выполнены по формуле (7) и сведены в табл. 5, при этом учтено, что, если по результатам экспериментов средний объем раствора, подаваемый в полость для создания экрана, составил 4800 см³, то при постоянной скорости перемещения рабочего органа 0,33 см/с значение V/t будет составлять $16,38 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Анализ табл. 5 показывает, что реактивная составляющая имеет достаточно малое значение, однако ее изменения имеют систематический характер и она увеличивается с увеличением давления подачи раствора и его плотности.

Сравнение усилия образования полости при прокладывании экрана (F_n) с усилием перемещения рабочего органа без образования экрана ($F_{\text{сух}}$)

показывает, что эта разница также имеет систематический характер в сторону уменьшения значений фактических усилий, причем разница зависит от всех вышеперечисленных факторов – вертикального давления на рабочий орган, давления подачи и плотности раствора. Однако, по сравнению с реактивной составляющей имеет существенное значение и ее вклад в уменьшение тягового усилия при прокладке экрана (колеблется от 9,2 до 27%).

Можно предположить, что уменьшение тягового усилия при устройстве ГПЭ происходит за счет возникновения вибрации рабочего органа при выходе раствора под давлением через форсунки и дополнительного увлажнения окружающего песка (от 9 до 14%).

Уменьшение сопротивления перемещению твердого тела за счет изменения свойств песчаной среды, вызванного вибрацией твердого тела и дополнительным увлажнением песка, подтверждается и другими исследователями [14; 15].

Величина вибрационной составляющей тягового усилия $F_{\text{виб}}$ при создании экрана на стенде и ее соотношение с усилием перемещения рабочего органа без образования экрана ($F_{\text{сух}}$) в зависимости от вышеперечисленных факторов приведена в табл. 5.

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости вибрационной составляющей тягового усилия $F_{\text{виб}}$ соответственно от плотности раствора и давления подачи раствора.

Таблица 5 – Результаты определения реактивной (F_p) и вибрационной ($F_{\text{виб}}$) составляющих тягового усилия (F) (продолжение на следующей странице)

Р _{верт} = 0,4 * 9,81 * 10 ⁴ Па									
Усилие, Н	ρ _{ра-ра} * 10 ³ кг/м ³								
	1,20			1,28			1,35		
	P _{под} * 9,81 * 10 ⁴ Па								
	0,70	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00
F _p	0,210	0,232	0,251	0,217	0,239	0,260	0,223	0,246	0,267
F _з	1299,26	1278,84	1244,38	1233,08	1193,88	1160,78	1202,73	1144,77	1099,07
F _п = F _з +F _p	1299,47	1279,07	1244,63	1233,30	1194,12	1161,04	1202,95	1145,02	1099,34
F _{сух}	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48
(F _p /F _{сух})* 100%	0,014	0,016	0,017	0,015	0,016	0,018	0,015	0,017	0,018
F _{виб} = F _{сух} -F _п	166,01	186,41	220,85	232,18	271,36	304,44	262,53	320,46	366,14
(F _{виб} /F _{сух})* * 100%	11,33	12,72	15,07	15,84	18,52	20,77	17,91	21,87	24,98

Таблиця 5 (окончание) – Результаты определения реактивной (F_p) и вибрационной ($F_{виб}$) составляющих тягового усилия (F)

$P_{верт} = 0,8 * 9,81 * 10^4$ Па									
Усилие, H	$\rho_{ра-ра} * 10^3$ кг/м ³								
	1,20			1,28			1,35		
	$P_{подачи} * 10^5$ Па								
	0,70	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00	0,70	0,85	1,00
F_p	0,210	0,232	0,251	0,217	0,239	0,260	0,223	0,246	0,267
F_3	2085,29	1989,15	1866,59	1984,96	1869,44	1744,04	1900,62	1781,75	1676,81
$F_{п} = F_3 + F_p$	2085,50	1989,38	1866,84	1985,18	1869,68	1744,30	1900,84	1782,00	1677,08
$F_{сух}$	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01	2297,01
$(F_p/F_{сух}) * 100\%$	0,009	0,010	0,011	0,009	0,010	0,011	0,010	0,011	0,012
$F_{виб} = F_{сух} - F_{п}$	211,51	307,63	430,17	311,83	427,33	552,71	396,17	515,01	619,93
$(F_{виб}/F_{сух}) * 100\%$	9,21	13,39	18,73	13,58	18,60	24,06	17,25	22,42	26,99

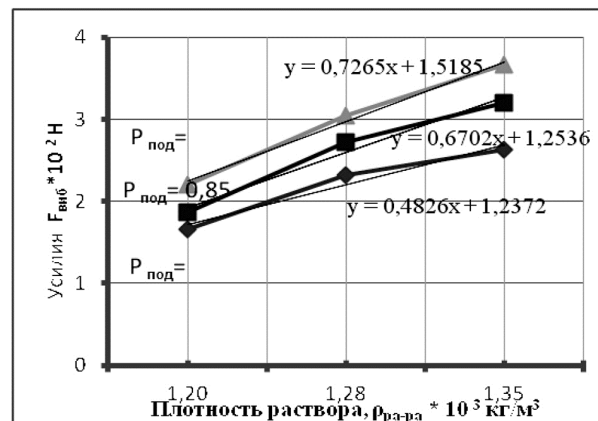
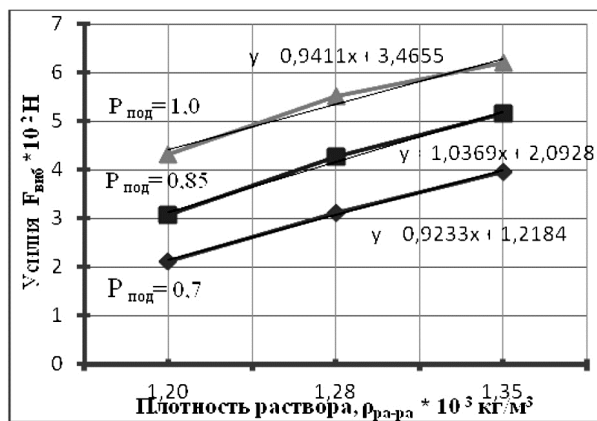


Рисунок 4 – График зависимости вибрационной составляющей тягового усилия от плотности раствора ПФМ при вертикальном давлении: а – 0,8 атм.; б – 0,4 атм

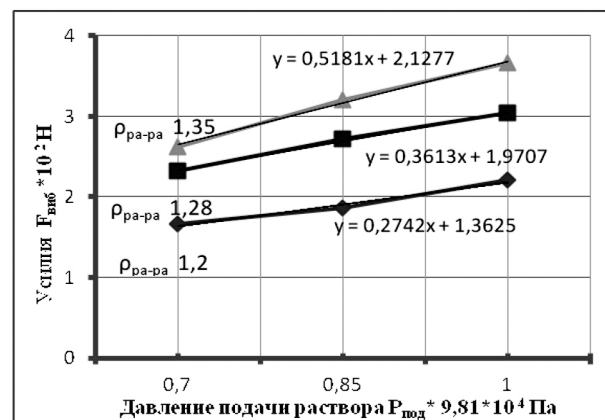
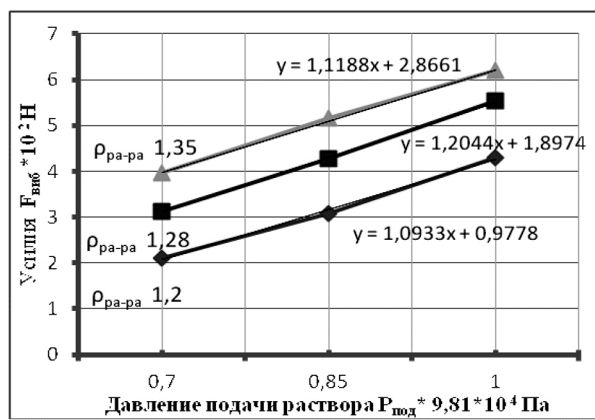


Рисунок 5 – График зависимости вибрационной составляющей тягового усилия от давления подачи раствора ПФМ при вертикальном давлении: а – 0,8 атм.; б – 0,4 атм

Исходя из результатов экспериментов на крупномасштабном стенде, можно сделать вывод, что существенное уменьшение тягового усилия при образовании экрана происходит за счет вибрации рабочего органа, возникающей при выходе раствора под давлением из форсунок и за счет дополнительного увлажнения песка вокруг экрана. Снижение тягового усилия в среднем составляет 18%.

Исходя из вышеприведенного, математическая модель, описывающая процесс устройства горизонтального экрана, может быть представлена в виде балансного уравнения (8):

$$F = S(B\rho_n v^2 + P_6) - F_{\text{виб}} - \sqrt{2P_{\text{под}}\rho_{p-pa}} \cdot \frac{V}{t}. \quad (8)$$

При этом оценочные уравнения определения $F_{\text{виб}}$, на основании данных табл. 5, как функции двух переменных – давления подачи раствора (x) и его плотности (y), построенные по индуктивному методу самоорганизации моделей [16] с обнулением коэффициентов с внешним критерием минимизации отклонений от градиента изменения направления поверхности

$$\text{grad}\left(\frac{\partial F}{\partial x}; \frac{\partial F}{\partial y}\right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

будут иметь вид:

– для вертикального давления 0,8 атм.

$$F_{\text{виб } 0,8} = 8,31P_{\text{под}} + 9,74\rho_{p-pa} - 15,4; \quad (10)$$

– для вертикального давления 0,4 атм.

$$F_{\text{виб } 0,4} = 2,57P_{\text{под}} + 6,92\rho_{p-pa} - 8,47. \quad (11)$$

Погрешность определения $F_{\text{виб}}$ эмпирическим путем по сравнению с данными лабораторных исследований для вертикального давления 0,8 атм. находится в пределах $-8,9 \div +9,9\%$, при среднем абсолютном значении погрешности 5,4%, а для вертикального давления 0,4 атм. – в пределах

$-8,3 \div +8,9\%$, при среднем абсолютном значении погрешности 5,0%, что для технологических экспериментов в грунтовой среде является допустимым.

Графики соответствующих поверхностей приведены на рис. 6.

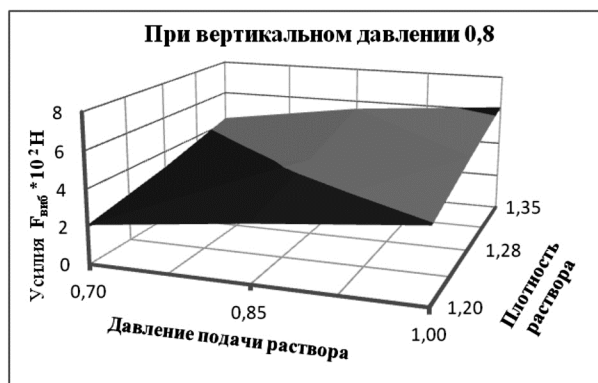
Выводы

1. Создание крупномасштабного стенда позволило моделировать технологию устройства ГПЭ в грунтовых условиях, более приближенным к реальным, чем условия проведения экспериментов на приставке к сдвиговому прибору.

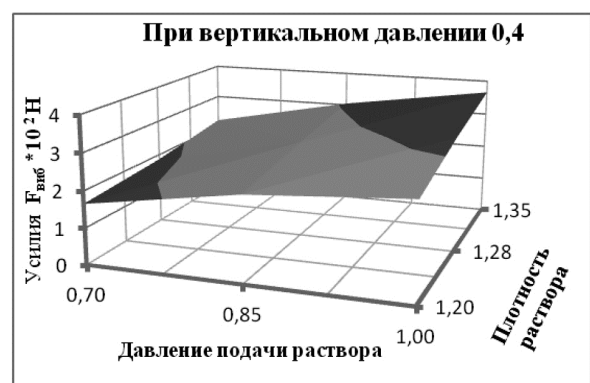
2. Проведена оценка влияния технологических факторов: вертикального давления, давления подачи и плотности раствора на тяговое усилие перемещения рабочего органа, необходимого для создания экрана.

3. Исследования, проведенные в условиях крупномасштабного стенда, позволили скорректировать значение коэффициента B , учитывающего влияние среды и форму рабочего органа, а также показали, что удельное сопротивление перемещению рабочего органа в бункере с песком в среднем составляет 0,8 МПа, что практически в 6 раз меньше этого показателя, полученного в предварительных исследованиях на приставке к сдвиговому прибору, при этом удельное сопротивление перемещению рабочего органа в бункере с песком при образовании экрана в среднем составляет 0,54 МПа, а максимальное – 0,72 МПа.

4. Разработана математическая модель, процесса устройства ГПЭ, представленная в виде балансного уравнения по определению тягового усилия перемещения рабочего органа при создании экрана, учитывающего вибрационную и реактивную составляющие.



а



б

Рисунок 6 – График зависимости вибрационной составляющей тягового усилия от давления подачи раствора и его плотности при вертикальном давлении: а – 0,8 атм.; б – 0,4 атм

5. Показано, что вибрация рабочего органа, возникающая при выходе раствора под давлением из форсунок в горизонтальную полость с учетом дополнительного увлажнения окружающего песка, снижает тяговое усилие в среднем на 18%, в то время как реактивная составляющая имеет

незначительное влияние на уменьшение тягового усилия рабочего органа при создании экрана.

6. Получены оценочные уравнения для определения величины вибрационной составляющей тягового усилия как функции двух переменных – давления подачи раствора и его плотности.

Список литературы

1. Смородинов М.И. Устройство фундаментов и конструкций способом "стена в грунте" / М.И.Смородинов, Б.С.Федоров. – М.: Стройиздат.– 1986. – 216 с.
2. Филахтов А.Л. Опыт возведения сооружений методом "стена в грунте" / А.Л. Филахтов, Г.К. Лубенец, Н.В. Писанко и др. – К.: Будивельник. – 1981. – 236 с.
3. Траншейные стенки в грунтах / Круглицкий Н.Н., Мильковицкий С.И., Скворцов В.С. и др. – К.: Наукова думка. – 1973. – 304 с.
4. Методические рекомендации по проектированию и строительству монолитных заглубленных частей гидротехнических сооружений и противодиффузионных завес способом "стена в грунте" // НИИОСП им Н.М. Герсеванова. – 1981. – 121 с.
5. Рекомендации по возведению заглубленных сооружений и конструкций методом "стена в грунте" // НИИСП. – 1973. – 156 с.
6. ДСТУ-Н Б В.2.1-29:2014 "Настанова щодо проектування і влаштування заглиблених споруд способом "стіна в ґрунті" // Мікрореґіон України.–2014.–56 с.
7. Ветров Ю.А., Баладинский В.Л. Машины для специальных земляных работ. – К.: Вища шк. – 1980. – 192 с.
8. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами // Машиностроение.– 1968. – 376 с.
9. Горячкин В.П. Собрание сочинений // Колос.– 1965. – Т. 2. – 460 с.
10. Спосіб влаштування екрану під спорудою / Деклараційний патент на винахід № 35065 А від 15.03.2001, бюл. №2.
11. Galinskiy A. Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures. Conference proceedings XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11 September 2014, Vienna, Austria, volume 2 Paper No. 1213-1219.
12. Галінський О.М., Горда О.В. Основні аспекти теоретичних досліджень та моделювання процесу влаштування горизонтального екрану під спорудою // Нові технології в будівництві. – НДІБВ. – 2014. – №27-28. – С.3-9.
13. Галинский А.М. Определение эмпирических зависимостей для уточнения математической модели процесса устройства горизонтального экрана под сооружением // Молодой ученый. – 2015. – № 8 (23). – Ч. 1. – С. 17-23.
14. Панкратова К.В., Ларионова А.М. Влияние вибрационных нагрузок на физико-механические свойства и микробную составляющую дисперсных пород. [Электронный ресурс]. – http://www.rusnauka.com/15NPN_2013/Geographia/6_138503.doc.htm
15. Маслов Н.Н., Казарновский В.Д. Определение сопротивляемости грунтов сдвигу методом плотности-влажности. //Автомобильные дороги.– 1962. – № 12. – С. 7-10.
16. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – К.: Наукова думка, 1982. – 296 с.

Статья поступила в редколлегию 12.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Тугай, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Галінський Олександр Михайлович

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, директор

Державне підприємство "Науково-дослідний інститут будівельного виробництва" (НДІБВ), Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВЛАШТУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЕКРАНА

Анотація. У Науково-дослідному інституті будівельного виробництва (НДІБВ) ведуться дослідження технології влаштування горизонтальних протифільтраційних екранів (ГПЕ) під наявними спорудами з використанням методу горизонтально-спрямованого буріння свердловин. Для розробки математичної моделі влаштування ГПЕ проведено комплекс експериментів на великому стенді. Встановлено вплив технологічних чинників: вертикального тиску, тиску подачі і щільності розчину на тягове зусилля переміщення робочого органу, необхідного для створення екрана. Отримана математична модель, що описує процес влаштування ГПЕ, яка представлена у вигляді балансового рівняння з визначення тягового зусилля, що враховує вібраційну і реактивну складові, які виникають при виході розчину під тиском з форсунок робочого органу в горизонтальну порожнину. Отримані оціночні рівняння для визначення величини вібраційної складової тягового зусилля як функції двох змінних – тиску подачі розчину і його щільності.

Ключові слова: технологія; експеримент; горизонтальний екран; математична модель; тягове зусилля

Galinskiy A.M.

PhD (Eng), senior researcher, Director

Research Institute of building production (RIBP), Kiev

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT
OF MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF HORIZONTAL SCREEN**

Abstract. At the Research Institute of Building Production (RIBP) we conduct the researches of technology for horizontal impervious screens (HIS) under the existing buildings, using the method of horizontal directional wells' drilling. To define the mathematical model of the HIS we conducted a set of experiments on a large-scale stand. The influence of technological factors: vertical pressure, feed pressure and density of the solution on a traction movement of the working body, needed to create the screen was defined. The mathematical model describing the process of HIS construction in the form of balanced equation for the determination of traction force was obtained. Model takes into account vibration and reactive components occurring when output of the solution under pressure from nozzles of the working body in the horizontal cavity. The estimating equations to determine the magnitude of the vibration component of the traction force as a function of two variables, namely the feed pressure of the solution and its density were defined.

Keywords: technology; experiment; horizontal screen; mathematical model; traction

References

1. Smorodinov M. & Fedorov, B. (1986). Construction of foundations and structures using "wall in the ground". Stroizdat, 216.
2. Filahtov, A., Lubenets, G. & Pisanko, N. (1981). Experience in the construction of facilities by the "wall in the ground" method. Budivelnyk, 236.
3. Kruglitsky, H., Milkovitski, S. & Skvortsov, V. (1973). Trench wall in the ground. Naukova Dumka, 304.
4. Guidelines for design and construction of monolithic underground parts of hydraulic structures and impervious screens using "wall in the ground". (1981). NIIOSP named Gersevanov N., 121.
5. Recommendations on the construction of underground facilities and structures by the method "wall in the ground". (1973). NIISP, 156.
6. DSTU-N B V. 2.1-29:2014 "Guidelines for design and construction of underground facilities by method "wall in the ground". (2014). Minregion of Ukraine, 56.
7. Vetrov, Y. & Baladinsky, V. (1980). Machines for special earth works. Vischa shkola, 192.
8. Zelenin, A. (1968). Fundamentals of soil destruction by mechanical methods. Mashinostroenie, 376.
9. Goryachkin, V. (1965). Collected works. Kolos: V.2., 460.
10. The method of the device of the screen under the building /Declaration patent for invention No. 35065 A, from 15.03.2001, bul. №2.
11. Galinskiy, A. (2014). Research of technology of horizontal construction of impervious screen under the existing structures. Conference proceedings of the XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014), 9-11 September 2014, Vienna, Austria, volume 2, Paper No 1213-1219.
12. Galinsky, A. & Gorda, E. (2014). Key aspects of theoretical research and modeling of the process of construction of the horizontal screen under facility. New technologies in construction. NDIBV, 27-28, 3-9.
13. Galinsky, A. (2015). Determination of empirical relationships to clarify the mathematical model for the horizontal screen construction under facility, Young scient, 8 (23), Part 1, 17-23.
14. Pankratova, K., Larionova, A. (2013). Effect of vibration loads on the physical and mechanical properties and the microbial component of dispersed rocks. http://www.rusnauka.com/15_NPN_2013/Geographia/6_138503.doc.htm
15. Maslov, N., Kazarnovsky, V. (1962). Kazarnovskii Determination of shear resistance of soil by moisture-density method. Road, 12, 7-10.
16. Ivakhnenko, A. (1982). The Inductive method of self-organization of models of complex systems. Naukova Dumka, 296.

Ссылка на публикацию

APA Galinskiy, A.M. (2015). Experimental and theoretical research and development of mathematical model of the process of horizontal screen. Management of Development of Complex Systems, 24, 154-163.

ГОСТ Галинский А.М. Экспериментально-теоретические исследования и разработка математической модели процесса устройства горизонтального экрана [Текст] / А.М. Галинский // Управление развитием сложных систем. – 2015. – № 24. – С. 154 – 163.