

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА  
В ПЕСКЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА  
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКРАНА НА СТЕНДЕ**

*Александр Галинский*

*Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт строительного производства»  
Червонозоряный проспект, 51, Киев, Украина, 03110, e-mail: agalin@ukr.net*

**THE DEFINITION OF MOVING EFFORT OF THE WORKING BODY  
IN THE SAND DURING THE STAND RESEARCH OF TECHNOLOGY  
OF HORIZONTAL SCREEN**

*Alexander Galinskiy*

*The state «Research Institute of building production»  
Chervonozoryany prospect, 51, Kiev, Ukraine, 03110, e-mail: agalin@ukr.net*

*АННОТАЦИЯ. Рассмотрена задача устройства горизонтального противофильтрационного экрана (ГПЭ) под сооружением с целью защиты грунтов от загрязнения техногенными стоками. Проведены экспериментальные исследования по определению тягового усилия перемещения режущего ножа в песке. Установлено влияние технологических факторов – вертикального давления, давления подачи и плотности раствора – на тяговое усилие, необходимое для создания экрана. На основе полученных зависимостей даны рекомендации по конструированию рабочего органа для устройства ГПЭ.*

*Ключевые слова: технология; эксперимент; горизонтальный экран; тяговое усилие.*

*АНОТАЦІЯ. Розглянуто задачу влаштування горизонтального протифільтраційного екрана (ГПЕ) під спорудою з метою захисту ґрунтів від забруднення техногенними стоками. Проведено експериментальні дослідження з визначення тягового зусилля переміщення ріжучого ножа в піску. Встановлено вплив технологічних чинників – вертикального тиску, тиску подачі й густини розчину – на тягове зусилля, необхідне для створення екрану. На основі отриманих залежностей дано рекомендації з конструювання робочого органа для влаштування ГПЕ.*

*Ключові слова: технологія; експеримент; горизонтальний екран; тягове зусилля.*

*ABSTRACT. Purpose. To protect the soil from pollution by technogenic drains we consider the task of horizontal impervious screen (HIS) construction under facility. Methodology/approach. Experimental studies on the traction of the working body movement in the sand while HIS constructions were conducted. Findings. The equation for traction force of working body movement in the sand while HIS construction was retrieved. Limitations/implications. The directions for construction of the working body were described. Originality/value. The influences of technological factors: vertical pressure, feed pressure and density of the solution onto the traction movement of the working body, needed for the screen construction, were determined.*

*Key words: technology; experiment; horizontal screen; traction force.*

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения токсичными стоками, локализация распространения токсичных веществ и радионуклидов как по площади, так и на значительные глубины является актуальной и сегодня. Локализация загрязненных грунтов и стоков достаточно надежно решается применением совершенных противофильтрационных завес, возводимых способом "стена в грунте". Однако эффективность такой вертикальной завесы значительно снижается в случае отсутствия на практике

ски 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 важную задачу определения усилий перемещения рабочего органа при создании горизонтальной полости в грунте в замкнутом пространстве под воздействием вертикальной нагрузки.

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Предварительные исследования, проведенные в НИИ строительного производства, показали возможность создания горизонтального противодиффузионного 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 Ветрова Ю.А., Баладинского В.Л., Зеленина А.Н., Баловнева В.И., Сукача М.К. показал направления исследования влияния формы рабочего органа и свойств грунта на процесс образования горизонтальной полости для устройства противодиффузионного экрана в замкнутом пространстве под сооружением.

Одной из задач создания технологии устройства горизонтального противодиффузионного экрана под сооружением является определение усилий перемещения рабочего органа при образовании экрана на базе известных зависимостей с использованием теоретических методов и экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

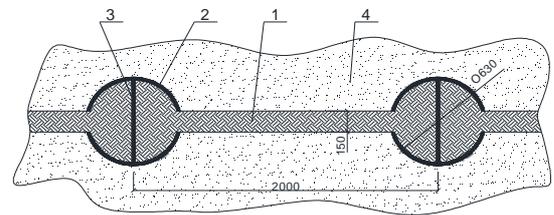
На основании исследований на крупномасштабном стенде установить эмпирические зависимости усилий перемещения рабочего органа в сыпучей среде от вертикального давления, давления подачи раствора, плотности раствора и свойств среды, а также получить значения коэффициентов, учитывающих свойства среды и форму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

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Научно-исследовательским институтом строительного производства предлагается новая технология устройства горизонтального противодиффузионного экрана (ГПЭ) [1] для защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения, которая базируется на техноло-

гии устройства горизонтальных скважин методом горизонтально-направленного бурения (ГНБ).

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



**Рис.1.** Фрагмент ГПЭ:

1 – горизонтальная полость, заполненная противодиффузионным материалом; 2 – горизонтальная скважина с разделительным элементом; 3 – перегородка разделительного элемента; 4 – окружающий грунт

**Fig.1.** Fragment of the HIS:

1 – is a horizontal cavity filled with impervious material; 2 – horizontal well with a separation element;

3 – partition of the separating element; 4 – the surrounding soil

При всем многообразии процессов, подлежащих изучению, основной задачей является изучение процесса образования горизонтальной полости в грунте под воздействием вертикального давления и определение сопротивлений перемещению рабочего органа в грунте, необходимых для обоснованного выбора технологического оборудования для образования полости, основным параметром которого является тяговое усилие.

На сегодня существует большое число исследований процесса поверхностного (отвального) резания грунта ножом и разработаны достаточно хорошие математические модели. Наиболее распространенными моделями такого процесса являются модель Ю.А. Ветрова [2, 3] – процесс резания при малых скоростях, уточненная модель В.Л. Баладинского [4] – для скоростей больше

20м/с, модели, разработанные А.Н. Зеленым, В.И. Баловневым и др [5 – 7].

Процесс безотвального резания в замкнутой среде методом протягивания грунто-разрабатывающего рабочего органа (ножа) имеет существенные отличия и требует учета других параметров и использования других моделей. Задачи такого типа рассматриваются в разделе механики взаимодействия твердого тела с деформируемой средой (в данном случае песчаным грунтом). Наиболее изученными являются вопросы взаимодействия твердых тел с классическими моделями сред (несжимаемой вязкой жидкостью, упругой средой). Значительно меньше работ посвящено неклассическим средам, в частности линейным вязко-упругим средам. Фактически не исследованы задачи движения твердых тел в сжимаемой вязкой жидкости.

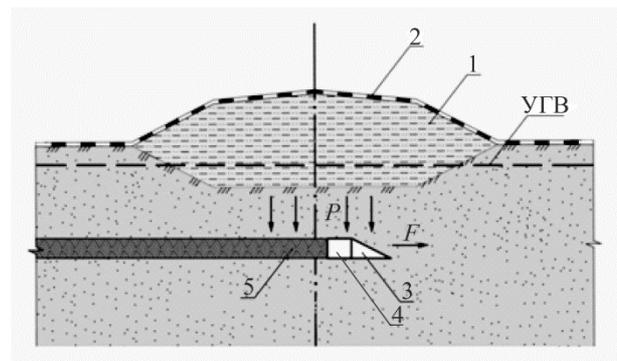
В силу сложности задачи проникновения тела в среде основная роль отводится экспериментально-теоретическим методам. Согласно существующим исследованиям для рассматриваемой задачи существенными будут следующие характеристики рабочего органа: геометрические параметры, к которым относятся не только размеры рабочего органа, а и его форма, которая влияет на характер процессов взаимодействия со средой и на процессы, возникающие в самой среде под его воздействием; масса; материал, определяющий коэффициент трения; скорость перемещения рабочего органа.

Для реализации рассматриваемой технологии рабочий орган представляется в виде двух частей: режущей части – ножа и задней части – стабилизатора. На практике наиболее часто используют две формы режущей части – клиновидную и закругленную (сферическую, эллиптическую или имеющую выпуклую поверхность второго порядка).

В процессе устройства экрана при движении рабочего органа на него будут действовать силы (рис. 2), воздействие которых будет компенсироваться направляющими, задающими прямолинейное направление. Однако для обеспечения стабильного движения нож необходимо сбаланси-

ровать таким образом, чтобы центр масс находился ближе к режущей кромке.

Процесс прокладывания горизонтального экрана можно представить как совокупность двух основных процессов: прокладывание пути передней режущей частью рабочего органа и прокладывание (укладка) экрана.



**Рис. 2.** Схема сил, действующих на рабочий орган:  $P$  – вертикальное давление;  $F$  – усилие перемещения рабочего органа (ножа); 1 – хранилище отходов; 2 – надземная гидроизоляция; 3 – нож рабочего органа; 4 – стабилизатор рабочего органа; 5 – ГПЭ

**Fig. 2.** Diagram of the forces acting on the working body:  $P$  – the vertical pressure;  $F$  – the movement force of the working body (knife); 1 – waste storage; 2 – above-ground waterproofing; 3 – the knife of the working body; 4 – the stabilizer of the working body; 5 – HIS

Возможность реализации предлагаемой технологии в основном определяется реализуемостью первого процесса – возможностью перемещения рабочего органа в среде.

Процесс проникновения рабочего органа в грунт условно можно разделить на три отдельные задачи расчета усилий сопротивления: для режущей ножевой части, для стабилизирующей части и для боковых стен ножевой части.

Общее усилие находится суммированием полученных значений усилий для каждой отдельной части. Однако, как показывают эксперименты М.К. Сукача [8 – 10], основные усилия связаны с перемещением режущей части ножа. Для решения задачи определяются следующие исходные данные: физико-механические характеристики

грунта (угол внутреннего трения, сцепление, плотность, угол трения грунта по металлу), параметры ножевой части (угол заострения клина, толщина клина, ширина клина, длина ножевой части и боковых стен), траектория движения.

Прочность сыпучего тела (сопротивление разрушению) в основном определяется его сопротивлением сдвигу или срезу. Сопротивление сыпучего тела растяжению связано с его сопротивлением сдвигу, а сопротивление сжатию зависит от прочности частиц и от тех давлений, которые возникают в местах контакта и могут достигать больших значений [11].

Вышеупомянутые исследования показывают, 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.

Из анализа работ по механике сплошной среды для эмпирического подхода можно предположить, что сила сопротивления среды  $F$  определяется в виде суммы трех сил

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (1)$$

где  $F_1$  – сила динамического сопротивления, вызванная инерцией частиц среды, принимается пропорциональной квадрату скорости проникания тела в среду;  $F_2$  – сила вязкости среды, возникающая за счет преодоления трения между частицами среды;  $F_3$  – сила статического сопротивления, которая оказывает существенное влияние и

величина которой не зависит от скорости движения тела [12].

Таким образом, силу сопротивления среды можно представить в виде уравнения

$$F = AV^2 + BV + C, \quad (2)$$

где  $A, B, C$  – положительные константы, зависящие от свойств среды и формы движущегося в ней тела;  $V$  – скорость перемещения рабочего органа.

С учетом того, что скорость перемещение рабочего органа в грунте при устройстве горизонтального экрана мала (10... 12м/час) и того, что при таких скоростях преобладают упругие деформации, в работах [13, 14] для расчета необходимых усилий была предложена следующая упрощенная формула, которая позволяет учитывать процессы, протекающие в системе "твердое тело – сыпучая среда":

$$N = (B\chi_{po} \chi^2 + P_{верт}), \quad (3)$$

где  $N=F/S$  – удельное усилие перемещения рабочего органа в песчаной среде, Па;  $S$  – площадь миделя;  $B$  – коэффициент, учитывающий свойства среды и форму рабочего органа;  $\rho_{po}$  – плотность материала рабочего органа, кг/м<sup>3</sup>,  $P_{верт}$  – вертикальное давление, Па.

Для изучения возможности образования горизонтального экрана в песчаном грунте в условиях воздействия вертикальной нагрузки, получения эмпирическим путем значений удельного сопротивления  $N$  и коэффициента  $B$  была проведена серия экспериментов [13, 14] на специальной приставке к серийному сдвиговому прибору ПСГ-2М для рабочих органов с клиновидной и радиальной формой режущего ножа.

Экспериментами установлено, что рабо-

**Таблица 1.** Уравнения регрессии удельного сопротивления перемещению рабочего органа от вертикального давления

**Table 1.** Regression equations of specific resistance to movement the working body of the vertical pressure

Степень уплотнения $I_d$	Угол заточки ножа $11^\circ$	Угол заточки ножа $25^\circ$	Радиальная заточка ножа
0,24	$y = 34,613x - 0,071$	$y = 25,025x + 0,524$	$y = 35,403x - 0,236$
0,52	$y = 49,408x + 0,275$	$y = 33,897x + 0,548$	$y = 57,129x - 0,852$
0,8	$y = 52,344x + 1,548$	$y = 47,957x + 0,609$	$y = 32,6 \cdot \ln(x + 0,138) + 51,17$

чий орган в виде ножа с радиальной заточкой легче стабилизируется и является оптимальным для образования полости, особенно при увеличении плотности песчаной среды. Поэтому нож такой формы был выбран для дальнейших исследований.

Обработка результатов эксперимента методами математической статистики позволила получить эмпирические зависимости удельного сопротивления перемещению рабочего органа  $N$  органа от вертикального давления и степени уплотнения песка для рабочих органов с клиновидной и радиальной формой режущего ножа (табл. 1), а с учетом формулы (3) – значения коэффициента  $B$ .

Исследования показали, что зона уплотнения ограничена малыми размерами грузового отсека приставки (340 x 100 x 110мм) 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 стенде значительно большего размера.

Для моделирования технологии устройства ГПЭ с учетом влияния различных факторов был создан крупномасштабный стенд, по-

зволяющий 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); прижимная крышка с прорезиненным днищем (пневмопригруз) для моделирования избыточного вертикального давления на грунт нагнетанием в нее компрессором воздуха; трубы, моделирующие горизонтальные скважины с ограничителями; 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)

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:

- первая – 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  $B$ ;
- вторая – эксперименты с прокладыванием ГПЭ для определения влияния технологи-

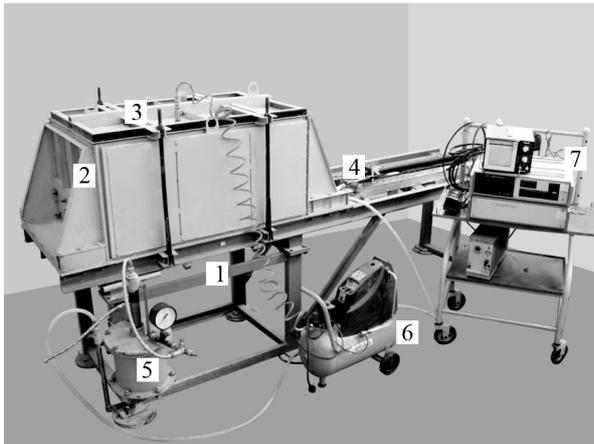
**Таблица 2.** Результаты определения тягового усилия  $F_{сyx}$  и удельного сопротивления перемещению рабочего органа  $N_{сyx}$  в песке без образования экрана

**Table 2.** Results of determination of traction  $F_{сyx}$  and specific resistance to movement of the working body  $N_{сyx}$  in the sand without the screen formation

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

ческих факторов на процесс образования экрана, на величину тягового усилия и удельного сопротивления перемещению рабочего органа в песке при образовании ГПЭ на качество экрана.

В первой 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  $1,65\text{г/см}^3$ . Вертикальное давление на рабочий орган, создаваемое песком и пневмопригрузом, составляло 0,4 и 0,8  $\text{кг/см}^2$ . 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.



**Рис. 3.** Стенд для моделирования технологии устройства горизонтального экрана:

1 – основание стенда; 2 – бункер; 3 – прижимная крышка; 4 – каретка привода перемещения рабочего органа; 5 – гидравлическая система подачи ПФМ; 6 – компрессор; 7 – измерительная система

**Fig. 3.** Stand for simulation technology of horizontal screen construction:

1 – base of the stand; 2 – bunker; 3 – clamping cover; 4 – carriage of the movement of the working body; 5 – hydraulic system for IM feed; 6 – compressor; 7 – metering system

Значение  $B$  определялось с учетом выражения (3) по формуле

$$B = \frac{N_{\text{сух}} - P_{\text{верт}}}{\gamma_{\text{по}} v^2} . \quad (4)$$

Для определения  $B_{\text{ст}}$  по результатам экспериментов на стенде использовались данные табл. 3, а для определения значения  $B_{\text{пр}}$  по результатам экспериментов на приставке использовалось уравнение регрессии для ножа с радиальной формой заточки (табл. 1):

$$y(x) = 32,62 * \ln(x + 0,138) + 51,17, \quad (5)$$

где  $y - N_{\text{сух}}$ ,  $x - P_{\text{верт}}$ .

Результаты определения  $B$  приведены в табл. 3, анализ которой показывает корреляционную связь результатов, полученных на приставке к сдвиговому прибору и стенде: изменение вертикального давления с 0,4 до 0,8  $\text{кг/см}^2$  больше чем в 1,5 раза в обоих случаях увеличивает удельное сопротивление перемещению рабочего органа и, соответственно коэффициент  $B$ .

Также установлено, что значения удельного сопротивления перемещению рабочего органа и, соответственно коэффициента  $B$ , 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 состоит в корректировке упрощенной формулы (3) по определению тягового усилия 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 раствора и плотности подаваемого раствора.

**Таблица 3.** Результаты определения значений *B*

**Table 3.** Results of determination of values *B*

№ п/п	Оборудования	$\rho_{пз}$ , кг/м <sup>3</sup>	$V$ , * 10 <sup>-2</sup> м/с	$P_{верт}$ , *9,81*10 <sup>4</sup> Па						$B_{0,8}/B_{0,4}$
				0,4			0,8			
				$N_{сух}$ * 10 <sup>4</sup> Па	$B*10^6$	$B_{np}/B_{cm}$	$N_{сух}$ * 10 <sup>4</sup> Па	$B*10^6$	$B_{np}/B_c$	
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

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/см<sup>2</sup>.

Экран состоял из трех параллельных полос, образуемых между ограничителями рабочим органом с форсунами, через которые в по-

лость за рабочим органом по тяговым раствороподводящим трубкам подавался раствор ПФМ плотностью от 1,2 до 1,35 г/см<sup>3</sup>. Давление подачи раствора варьировалось от 0,7 до 1 кг/см<sup>2</sup>.

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  $N_3$ . Ниже представлено уравнение регрессии по определению  $N_3$  в зависимости от технологи-

**Таблица 4.** Результаты определения средних значений тягового усилия и удельного сопротивления перемещению рабочего органа при образовании экрана

**Table 4.** Results of determination of the average values of traction and specific resistance to movement of the working body while screen formation

$P_{верт} = 9,81 * 10^4$ Па	$F_3$ , Н	$N_3 * 10^4$ Па	$F_3$ , Н	$N_3 * 10^4$ Па	$F_3$ , Н	$N_3 * 10^4$ Па
	$\rho_{р-ра}$ , * 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>					
	1,2		1,28		1,35	
	$P_{под} = 0,7 * 9,81 * 10^4$ 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
$P_{под} = 0,85 * 9,81 * 10^4$ 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
$P_{под} = 1,0 * 9,81 * 10^4$ 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

ческих факторов – вертикального давления  $X_1$ , давления подачи раствора  $X_2$  и плотности раствора  $X_3$ :

$$N_3 = 42,75 + 22,7X_1 - 2,3X_2 - 2,0X_3 - 1,59X_1X_2 - 1,14X_1X_3 - 0,12X_2X_3 - 0,07X_1X_2X_3, \quad (6)$$

В табл. 4 приведены результатам определения тягового усилия  $F_3$ .

Как показали исследования, при вертикальном давлении на экран  $0,04 \text{ кг/см}^2$ , давлении подачи раствора  $0,7 \dots 1 \text{ кг/см}^2$  и плотности раствора  $1,2 \dots 1,35 \text{ г/см}^3$  экран практически не получался, а при других вариациях факторов имел достаточно качественную структуру. Поэтому в дальнейших рассуждениях были использованы результаты экспериментов при вертикальных давлениях  $0,4$  и  $0,8 \text{ кг/см}^2$ .

В конструкции рабочего органа предусмотрены форсунки на его задней стенке для выхода раствора в полость, образующуюся за рабочим органом.

При выходе раствора ПФМ под давлением через форсунки возникает реактивная сила. Поэтому усилие, необходимое для устройства экрана  $F_3$  в песке, можно описать следующим общим балансным соотношением:

$$F_3 = F_n - F_p, \quad (7)$$

где  $F_n$  – усилие для образования полости в песке,  $H$ ;  $F_p$  – реактивная сила,  $H$ .

С использованием соотношения Мещерского для реактивной тяги при воздействии дополнительной внешней силы уравнение для определения тягового усилия можно представить в виде

$$F = S \left( W \rho_n v^2 + P_B \right) - \sqrt{\frac{2P_{\text{под}}}{\rho_{p-\text{ра}}}} \cdot \frac{m}{t} = S \left( W \rho_n v^2 + P_B \right) - \sqrt{2P_{\text{под}} \rho_{p-\text{ра}}} \cdot \frac{V}{t}, \quad (8)$$

$$\text{где } F_p = \sqrt{2P_{\text{под}} \rho_{p-\text{ра}}} \cdot \frac{V}{t}. \quad (9)$$

В формулах (8), (9)  $P_{\text{под}}$  – давление подачи раствора, Па;  $\rho_{p-\text{ра}}$  – плотность раствора,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V/t$  – объем поданного раствора за единицу времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Результаты расчета реактивной составляющей тягового усилия при образовании экрана при вертикальных давлениях  $0,4$  и  $0,8 \text{ кг/см}^2$  выполнены по формуле (9) и сведены в табл. 5. При этом учтено, что по результатам экспериментов средний объем раствора, подаваемого в полость для создания экрана, составил  $4800 \text{ см}^3$ . При постоянной скорости перемещения рабочего органа  $0,33 \text{ см/с}$  значение  $V/t$  будет составлять  $16,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

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. По сравнению с реактивной составляющей имеет существенное значение и ее вклад в уменьшение тягового усилия при прокладке экрана (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 [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.

**Таблица 5.** Результаты определения реактивной  $F_p$  и вибрационной  $F_{\text{виб}}$  составляющих тягового усилия  $F$ 
**Table 5.** The results of the determination of reactive  $F_p$  and vibration  $F_{\text{виб}}$  components of traction  $F$ 

$P_{\text{верт}} = 0,4 * 9,81 * 10^4 \text{ Па}$									
Усилие, $H$	$\rho_{\text{ра-ра}} * 10^3 \text{ кг/м}^3$								
	1,20			1,28			1,35		
	$P_{\text{под}} * 9,81 * 10^4 \text{ Па}$								
	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
$F_3$	1299,26	1278,84	1244,38	1233,08	1193,88	1160,78	1202,73	1144,77	1099,07
$F_{\text{п}} = F_3 + F_p$	1299,47	1279,07	1244,63	1233,30	1194,12	1161,04	1202,95	1145,02	1099,34
$F_{\text{сух}}$	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48	1465,48
$(F_p/F_{\text{сух}}) * 100\%$	0,014	0,016	0,017	0,015	0,016	0,018	0,015	0,017	0,018
$F_{\text{виб}} = F_{\text{сух}} - F_{\text{п}}$	166,01	186,41	220,85	232,18	271,36	304,44	262,53	320,46	366,14
$(F_{\text{виб}}/F_{\text{сух}}) * 100\%$	11,33	12,72	15,07	15,84	18,52	20,77	17,91	21,87	24,98

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

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, зависимость для расчета тягового усилия перемещения рабочего органа при создании полости для горизонтального экрана может быть представлена в виде балансного уравнения

$$F = S(B\rho_n v^2 + P_e) - F_{\text{виб}} - \sqrt{2P_{\text{под}}\rho_{\text{ра-ра}}} \cdot \frac{V}{t}. \quad (10)$$

При этом оценочные уравнения определения  $F_{\text{виб}}$  на основании данных табл. 5 как функции двух переменных – давления по-

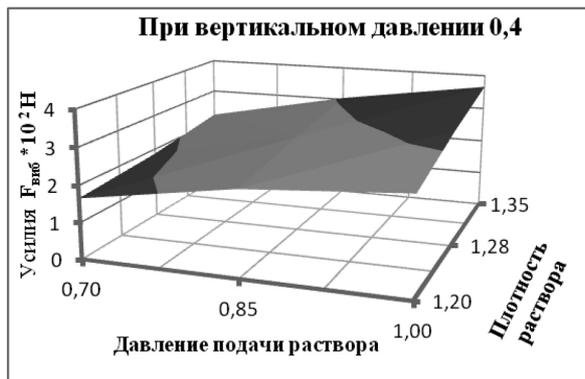
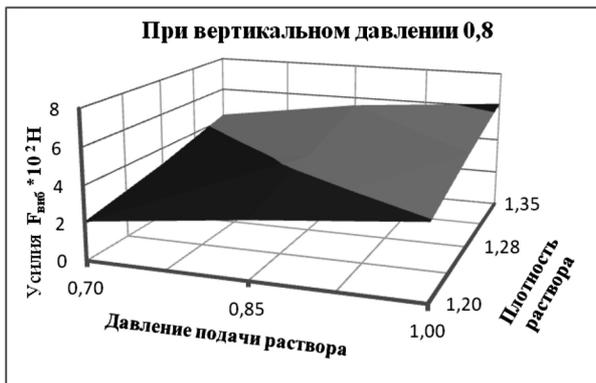
дачи раствора и его плотности – будут иметь вид:

$$F_{\text{виб } 0,8} = 8,31P_{\text{под}} + 9,74\rho_{p-pa} - 15,4; \quad (11)$$

$$F_{\text{виб } 0,4} = 2,57P_{\text{под}} + 6,92\rho_{p-pa} - 8,47. \quad (12)$$

Погрешность определения  $F_{\text{виб}}$  эмпирическим путем по сравнению с данными лабораторных исследований для вертикального давления 0,8 атм находится в пределах 8,9...+9,9% при среднем абсолютном значении погрешности 5,4%, а для вертикального давления 0,4 атм – в пределах 8,3...+8,9% при среднем абсолютном значении погрешности 5,0%, что для технологических экспериментов в грунтовой среде является допустимым.

Графики тяговых усилий приведены на рис 4.



а

б

**Рис. 4.** Зависимости вибрационной составляющей тягового усилия от давления подачи раствора и его плотности при вертикальном давлении: а – 0,8 кг/см<sup>2</sup>; б – 0,4 кг/см<sup>2</sup>

**Fig.4.** The dependence of the vibration component of the traction from the supply pressure of the solution and its density at vertical pressure: а – 0.8 kg/cm<sup>2</sup>; б – 0.4 kg/cm<sup>2</sup>

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования на крупномасштабном стенде позволили получить численные значения усилия перемещения рабочего органа под воздействием вертикального давления при образовании горизонтального экрана в песчаном грунте. При этом удельное сопротивление перемещению рабочего органа в бункере с песком в среднем составляет 0,54 МПа, а максимальное – 0,72 МПа.

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

3. Предложено балансное уравнение по определению тягового усилия перемещения рабочего органа при создании экрана, учитывающее вибрационную и реактивную составляющие.

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

5. При конструировании рабочего органа для образования горизонтального экрана следует предусматривать возможность создания его искусственной вибрации, что позволит уменьшить требования к величине тягового усилия оборудования для перемещения рабочего органа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Способ* улаштування екрану під спорудою, /Деклараційний патент на винахід № 35065 А від 15.03.2001, Бюл. №2/.
2. *Ветров Ю.А.* Машины для земляных работ. – Киев: Вища школа, 1981. – 346 с.
3. *Ветров Ю.А.* Сопротивление грунтов резанию. – Киев: Изд. Киевского университета, 1965. – 167 с.
4. *Баладинский В.Л.* Определение параметров процесса скоростной обработки горных пород / Известия вузов. Строительство. – 1994. – № 2. – С. 4-7.
5. *Баловнев В.И., Хмара Л.А.* Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1983. – 184 с.

6. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968.–376 с.
7. Недорезов И.А. Интенсификация рабочих органов землеройных машин. – М.: МАДИ, 1979. – 51 с.
8. Сукач М.К., Сукач А.М. Алгоритм критериальной оценки сопротивления резанию грунтов Известия вузов. Строительство. –1999. – № 2-3. – С. 61-63.
9. Сукач М.К., Филонов Ю.П., Пузаков Д.В. Характеристики процесса резания грунта в замкнутом пространстве // ГБДММ № 67,С. 8-11.
- 10.Сукач М.К., Филонов Ю.П., Литвиненко И.Н. Модель косоугольного щелевого резания грунта широким острым ножом // Техніка будівництва.– К.: КНУБА, 2005.– №.18.– С.4-11.
- 11.Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов / Уч. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
- 12.Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели: монография / А. М. Завьялов и др. - Омск: СибАДИ, 2012.- 411 с.
- 13.А. Galinskiy. Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures. Conference proceedings XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11September 2014, Vienna, Austria, volume 2 Paper No.1213-1219
- 14.Галинский А.М. Определение эмпирических зависимостей для уточнения математической модели процесса устройства горизонтального экрана под сооружением, Молодой вчений, № 8 (23), Часть 1, сепень, 2015. - С.17-23
- 15.Панкратова К.В., Ларионова А.М. Влияние вибрационных нагрузок на физико-механические свойства и микробную составляющую дисперсных пород. [http://www.rusnauka.com/15\\_NPN\\_2013/Geographia/6\\_138503.doc.htm](http://www.rusnauka.com/15_NPN_2013/Geographia/6_138503.doc.htm)
3. Vetrov Y.A., 1965. Resistance of soil to cutting. Kiev University, 167.
4. Balaganskii V.L., 1994. Determination of process parameters of high-speed processing of rocks / Izvestiya vuzov. Construction. 2. 4 - 7.
5. Balovnev V.I., Khmara L.A., 1983. Intensification of earthworks in road construction. Transport, 184.
6. Zelenin A.N., 1968. Fundamentals of soils destruction by mechanical methods. Mechanical Engineering, 376.
7. Nedorezov I.A., 1979. Intensification of the working bodies of earthmoving machines. MADI, 51.
8. Sukach M.K., Sukach A.M.,1999. Algorithm of criteria-based assessment of the soil cutting resistance. Izvestiya vuzov. Construction. 2-3. 61-63.
9. Sukach M.K., Filonov Y.P., Puzakov D.V., 2006. Characteristics of the cutting process of the soil in a confined space. GBDM 67. 8-11.
- 10.Sukach M.K., Filonov Y.P., Litvinenko I.N., 2005. The model of oblique slit digging with wide a sharp knife. Machinery contractor. KNUBA, 18. 4-11.
- 11.Vyalov S.S., 1978. Rheological fundamentals of soil mechanics. Tutorial for higher schools. Higher school, 447.
- 12.Zavyalov A.M., 2012. Mathematical modeling of working processes of road construction machines: simulation and adaptive models: SibADI, 411.
- 13.A. Galinskiy. Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures. Conference proceedings XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11September 2014, Vienna, Austria, volume 2 Paper No.1213-1219
- 14.Galinsky A.M., 2015. Determination of empirical relationships to clarify the mathematical model for the horizontal screen construction under facility, Young scientist, No 8 (23), Part 1, August, 17-23
- 15.Pankratova K.V., Larionov A.M. 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](http://www.rusnauka.com/15_NPN_2013/Geographia/6_138503.doc.htm)

#### REFERENCES

1. The way of screen construction under facility / Patent for invention number 35065 A of 15.03.2001, Byul. №2.
2. Vetrov Y.A., 1981. Earth-moving machines. Vishcha school,. 346.