

УДК 624.152.6

**Мирсаяпов И.Т.** – доктор технических наук, профессор

**Хасанов Р.Р.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [rubis.hasanov@yandex.ru](mailto:rubis.hasanov@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКИХ ОГРАЖДЕНИЙ С РАСПОРКОЙ В ПРОЦЕССЕ ПОЭТАПНОЙ РАЗРАБОТКИ ГРУНТА**

#### **АННОТАЦИЯ**

В статье приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния ограждающей конструкции с распоркой в процессе поэтапной разработки грунта, проведенных в лаборатории грунтоведения кафедры оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии. Выполнены анализ результатов исследований и сопоставление с расчетными данными, а также установлены некоторые особенности поведения ограждения котлована на разных этапах экскавации грунта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, ограждающая конструкция, распорка, давление грунта, призма обрушения.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor

**Khasanov R.R.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

### **EXPERIMENTAL STUDIES OF STRESS-STRAIN STATE OF FLEXIBLE BARRIERING DESIGN WITH BRACING IN THE PROCESS OF THE PHASED EXCAVATION OF THE SOIL**

#### **ABSTRACT**

In this article are brought the results of experimental studies of stress-strain state of the barriering structure with the spacer in the process of the phased excavation. An experiments was carried out in the laboratory of Bases, Foundations, Structural Dynamics and Engineering Geology department. Based on the analysis of research results and comparison with calculated data found some features of the behavior of barriering design in various stages of excavation.

**KEYWORDS:** soil, barriering design, bracing, pressure of the soil, prism collapse.

На сегодняшний день дефицит свободных для строительства земельных участков в мегаполисах и связанное с этим удорожание земли привело к неизбежному развитию подземного строительства.

В стесненных условиях строительства и особенно при необходимости создания глубоких котлованов встает вопрос обеспечения устойчивости вертикальных стен котлована. Для решения этой задачи наиболее широкое применение в практике строительства получили шпунтовые ограждения с распорками. Данный способ имеет ряд преимуществ и положительных качеств, по сравнению с другими способами крепления стен котлованов, и зачастую является единственно возможным.

В практике проектирования подпорных стенок и, в частности, весьма распространенных стенок из металлического и железобетонного шпунта до настоящего времени широко используются методы определения распора и отпора грунта, базирующиеся на классической теории давления. При этом сами стенки рассматриваются как вертикальные балки, находящиеся под воздействием активного и пассивного давлений грунта, определяемых по формулам Кулона (методы Э. Якоби, Блюма-Ломейера и др.). Однако получаемые при этом усилия в элементах ограждающих конструкций оказываются завышенными, а конструктивные решения – неэкономичными.

Уточнение существующих методов расчета заанкеренных стенок в части определения бокового давления грунта и усилий в распорке представляет собой весьма сложную задачу. Например, такие вопросы, как: точное определение активного давления грунта, оптимальная глубина погружения шпунта ниже дна котлована, перераспределение давления грунта по

высоте стенки, взаимодействие стенки с грунтом засыпки в условиях допредельного и предельного состояний и другие – до настоящего времени остаются не выясненными, а существующие теории и научные предположения, к сожалению, еще недостаточно отражают действительную работу конструкций [1].

В целях экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния ограждений с распорками в процессе поэтапной разработки грунта и установления некоторых закономерностей в лаборатории грунтоведения кафедры оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии была проведена серия модельных испытаний.

Целью проведения экспериментов являлось изучение изменения напряженно-деформированного состояния ограждающих конструкций котлована (определение усилий, возникающих в ограждении, перемещений характерных узлов) и ограждаемого ими грунта (изменение деформаций грунтового массива) в процессе его разработки.

Опыты проводились в металлическом объемном лотке размерами  $1000 \times 1000 \times 1000$  (h) (см. рис. 2), выполненном из листовой стали толщиной 7 мм.

Для моделирования ограждающей конструкции был применен оцинкованный металлический лист толщиной 1 мм размерами  $99 \times 80$  (h) см. Принятие такой малой толщины листа было обусловлено стремлением к созданию относительно гибкой конструкции, которая позволит проследить за качественной картиной деформаций изгиба стенки по высоте. В качестве распорок были использованы пластиковые трубки. Грунт засыпки – песок мелкий, маловлажный, средней плотности ( $\varphi = 32^\circ$ ,  $c = 1$  кПа,  $\gamma = 15,5$  кН/м<sup>3</sup>).

Для определения усилий, возникающих в металлическом листе, с тыльной стороны по высоте стенки было наклеено 7 тензометрических датчиков с шагом 10 см по центральной оси стенки. С помощью этих датчиков определялись деформации в стенке, по которым затем можно было перейти к усилиям.

Для оценки напряженно-деформированного состояния грунта были сконструированы грунтовые датчики из полос тонких алюминиевых листов шириной 2 см. В центре датчика устанавливался упругий элемент из силикона. На внешнюю сторону грунтового датчика приклеивался тензометрический датчик. При увеличении или уменьшении нагрузки данная конструкция обеспечивала, соответственно, сжатие или растяжение тензометрического датчика, по показаниям которого можно построить картину напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

В ходе проведения опытов, кроме тензодатчиков, было использовано следующее оборудование:

– индикаторы часового типа для измерения деформаций оседания поверхности ограждаемого грунта;

– прогибомеры для определения горизонтальных перемещений верхних точек стенки;

– прибор АИД для снятия показаний со всех тензометрических датчиков.

Подготовка эксперимента начиналась с того, что на дно пустого лотка засыпались первые 20 см грунта с уплотнением до заданной плотности (плотность грунта во всех опытах по результатам определения методом режущих колец составила  $1,52 \div 1,55$  г/см<sup>3</sup>). Затем проводилась установка стального листа, моделирующего шпунтовую стенку, который фиксировался вертикально на расстоянии 35 см от одной из сторон лотка (низ стенки на отметке -0.800, где за относительную отметку 0.000 принята отметка верхней поверхности ограждаемого грунта). После этого проводилась послойная равномерная засыпка грунта с обеих сторон листа. В процессе засыпки со стороны ограждаемого грунта на расстоянии 5 см от стенки и с шагом 10 см по высоте устанавливались грунтовые датчики.

Поверхность грунта разглаживалась и слегка поливалась водой из распылителя, чтобы в процессе испытания были более отчетливо видны деформации поверхности грунтового массива. Далее над грунтом устанавливалась деревянная рама, на которой фиксировались индикаторы часового типа для определения деформаций оседания поверхности ограждаемого грунта. Всего было установлено 5 индикаторов с шагом по 10 см от стенки.

На последнем этапе устанавливались прогибомеры, которые крепились к стенкам лотка и измеряли перемещения верхних точек ограждающей стенки в процессе проведения опыта.

На рис. 1 дана общая схема проведения опытов, где показано расположение стенки в лотке, тензодатчиков на стенке, грунтовых датчиков, индикаторов часового типа для определения осадки грунта и прогибомеров для определения перемещения верха ограждающей стенки, на рис. 2 представлен общий вид лотка, готового к проведению опыта.

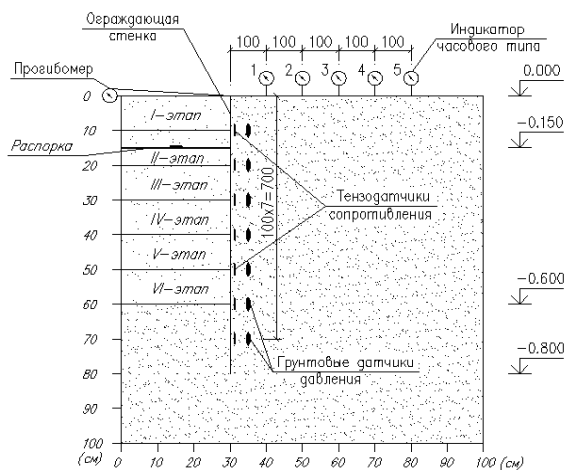


Рис. 1. Схема ограждающей стенки в лотке с расположением датчиков и измерительных приборов



Рис. 2. Лоток, подготовленный к проведению опыта

Эксперименты проводились на следующий день после подготовки лотка. После снятия нулевых (начальных) показаний всех приборов начиналась послойная разработка (экскавация) грунта, предполагающая всего 6 этапов. На каждом этапе снималось по 10 см грунта со стороны «котлована». После каждого этапа производилась десятиминутная пауза для стабилизации деформаций грунта и ограждающей конструкции, затем снимались показания тензодатчиков, фиксировались деформации грунта и стенки.

После снятия грунта до отметки -0.200 устанавливались распорки на отметке -0.150. Разработка грунта производилась до отметки -0.600.

Всего было проведено 5 опытов. Методика проведения опытов во всех случаях была одинакова, использовался один и тот же грунт, датчики и приборы.

Обобщенный поэтапный анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показал следующее (результаты измерений, осредненные для всех испытаний):

**I этап – откопка первых 10 см грунта**

По показаниям индикатора № 1 оседание поверхности грунта на расстоянии 10 мм от стенки составило в среднем 0,2 мм. Прогиб стенки по показаниям прогибомеров составил около 0,25 мм. Показания тензодатчиков на стенке изменились слабо. По полученной эпюре моментов видно, что изгиб стенки в грунте начал происходить по синусоидальному закону. Максимальное усилие 0,35 кг·м возникло на отм. -0.100.

**II этап – откопка 20 см грунта и установка распорки**

Качественная картина происходящего, по сравнению с первым этапом, существенно не изменилась. Эпюра моментов, в целом, сохранила свой вид, лишь изгибающий момент увеличился до 0,4 кг·м. Максимальное оседание поверхности грунта на расстоянии 10 см от стенки составило 1,5 мм, перемещение верха стенки составило около 1,0 мм. Видимых трещин на поверхности грунта не обнаружено.

**III этап – откопка 30 см грунта (половина глубины котлована)**

На данном этапе согласно показаниям индикаторов началось более активное, по сравнению с первыми двумя этапами, оседание поверхности грунта вблизи стенки, которое составило под индикатором № 1 около 2,5 мм. Основание призмы скольжения (обрушения) распространилось примерно на расстояние 10-15 см от ограждающей стенки, о чем свидетельствовало появление на указанном расстоянии нескольких мелких трещин длиной по 8-10 см параллельно стенке. Верх стенки продолжал двигаться в сторону котлована, а величина перемещения при этом составила около 1,3 мм. Максимальный изгибающий момент в верхней части стенки составил порядка 0,45 кг·м, в средней части – 0,4 кг·м, а в нижней заанкеренной части – 0,3 кг·м.

**IV этап – откопка 40 см грунта**

Начали происходить первые визуально заметные изменения. Следует отметить, что перемещение верха стенки в сторону котлована практически прекратилось (прогиб верха стенки в сторону котлована составил в среднем 1,4 мм), а в отдельных испытаниях

происходило даже перемещение стенки в обратную сторону. Наиболее активное оседание поверхности грунта происходило под первым и вторым индикаторами (максимальная осадка под индикатором № 1 составила около 4,0 мм), а дальше замедлялось. В средней части лотка на расстоянии 15-20 см от стенки появились хорошо заметные трещины длиной до 20 см, развивающиеся параллельно стенке, по которым можно предположить, что основание призмы скольжения увеличилось, по сравнению с предыдущим этапом. В пролетной части стенки (между распоркой и дном котлована) начала образовываться зона выпора, где возникли максимальные изгибающие моменты, составившие в среднем около 0,8 кг·м.

**V этап – откопка 50 см грунта**

Следует отметить резкое увеличение усилий, возникающих в стенке. Максимальный изгибающий момент возникал в середине пролетной части и составил в среднем около 2,7 кг·м. Также выросли усилия и в заанкеренной части стенки, где значение моментов составило 2,2 кг·м. Верх ограждающей стенки резко прогнулся в противоположную от котлована сторону. Это перемещение, по всей видимости, связано с разуплотнением и оседанием грунта в верхней части, что привело к значительному снижению сопротивления (активного давления) грунта в этой зоне. Среднее перемещение верха стенки в сторону ограждаемого грунтового массива составило 1,5 мм. Максимальная осадка грунта под индикатором № 1 составила около 9,0 мм. Также следует отметить, что поверхность ограждаемого грунта начала активно оседать на расстоянии до 30-40 см от стенки, стекая при этом в образующуюся от прогиба (выпора) стенки полость.

**VI этап – откопка 60 см грунта**

Качественная картина деформирования стенки и грунтового массива кардинально не изменилась. Перемещение верха стенки в сторону ограждаемого грунтового массива составило около 8,0 мм. Ширина зоны оседания поверхности грунтового массива снова увеличилась до 40-50 см от стенки, деформации оседания под индикатором № 1 составили около 25 мм. Прогиб стенки (выпор) в пролете между распоркой и дном котлована достиг значения порядка 30 мм. Максимальный изгибающий момент в пролетной части стенки (между распоркой и дном котлована) составил около 3,5 кг·м, а в нижней заанкеренной части – 4,0 кг·м.

Ниже приведены осредненные результаты экспериментов, в которых представлены эпюры перемещений стенки и оседания поверхности грунта, эпюры изгибающих моментов в стенке, зоны уплотнения и разуплотнения грунтового массива по высоте ограждающей стенки.

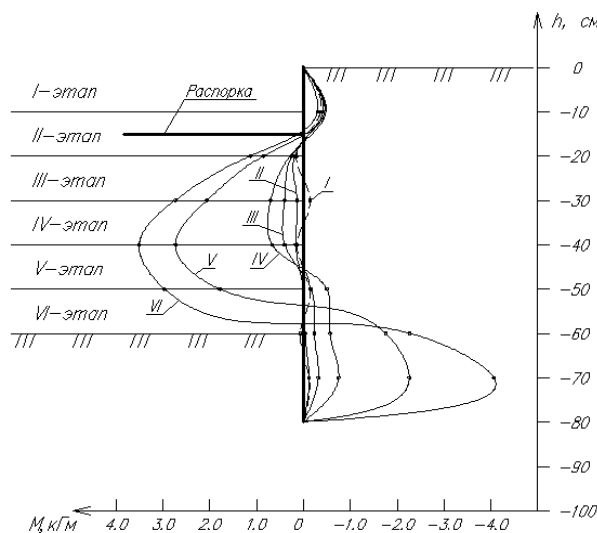


Рис. 3. Изменение значений изгибающего момента по высоте стенки на разных этапах разработки грунта в «котловане»

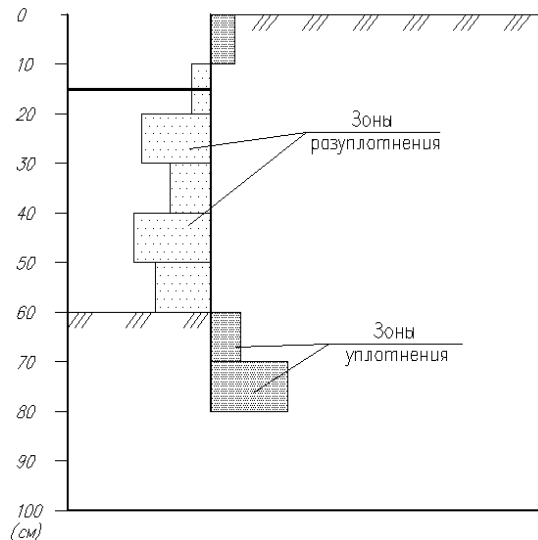


Рис. 4. Зоны уплотнения и разуплотнения грунта при глубине откопки «котлована» 600 мм

Для оценки применимости и достоверности существующих методик расчета шпунтовых ограждений с распорками проведен сравнительный анализ и сопоставление результатов расчета стенки по двум наиболее распространенным методикам с данными собственных экспериментальных исследований.

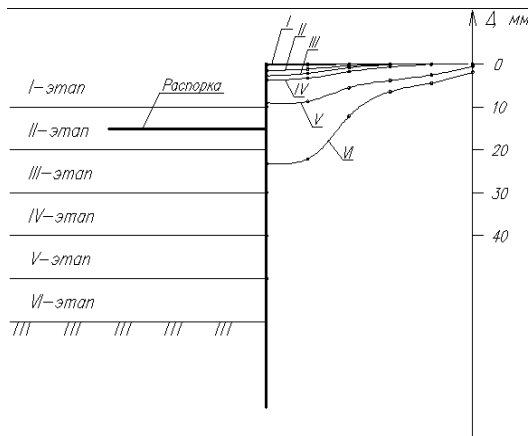


Рис. 5. Эпюры оседания поверхности грунта на разных этапах разработки грунта в «котловане»

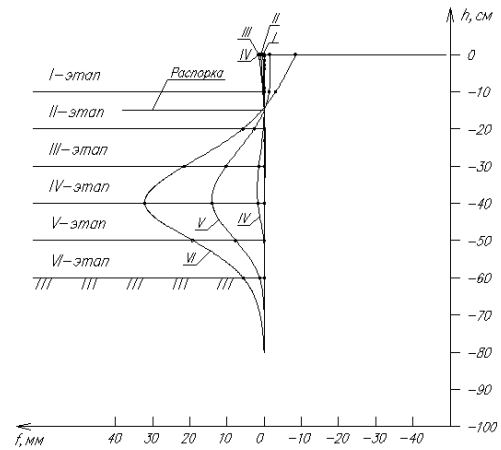


Рис. 6. Эпюры прогиба стенки на разных этапах разработки грунта в «котловане»

Расчеты шпунтовой стенки с распоркой произведены методом маятника (Э. Якоби) и методом упругой линии Блюма-Ломейера. Для сопоставления с результатами расчетов за основу были взяты осредненные результаты, полученные в опытах.

На рис. 7 приведены результаты расчета изгибающих моментов в сечениях шпунтовой стенки методом маятника (Э. Якоби) на последнем этапе разработки грунта, т.е. при глубине «котлована» 60 см.

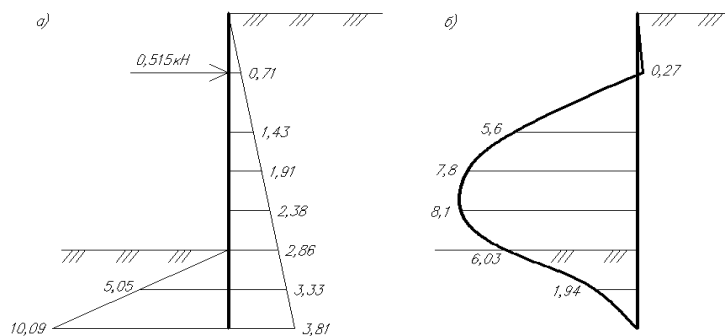


Рис. 7. Результаты расчета экспериментальной модели шпунтовой стенки методом маятника (Э. Якоби):  
а) эпюры активного и пассивного давлений, [кПа];  
б) эпюра изгибающих моментов по высоте стенки, [кГ·м]

Методом Блюма-Ломейера определены значения изгибающих моментов, возникающих в стенке, при глубине котлована 40, 50 и 60 см. Результаты расчетов приведены на рис. 8-10.

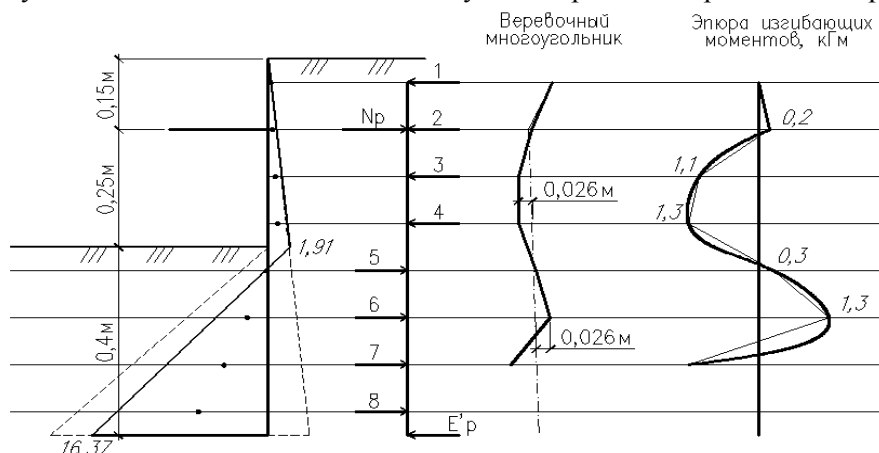


Рис. 8. Результаты расчета шпунтовой стенки методом Блюма-Ломейера при глубине «котлована» 40 см (IV этап)

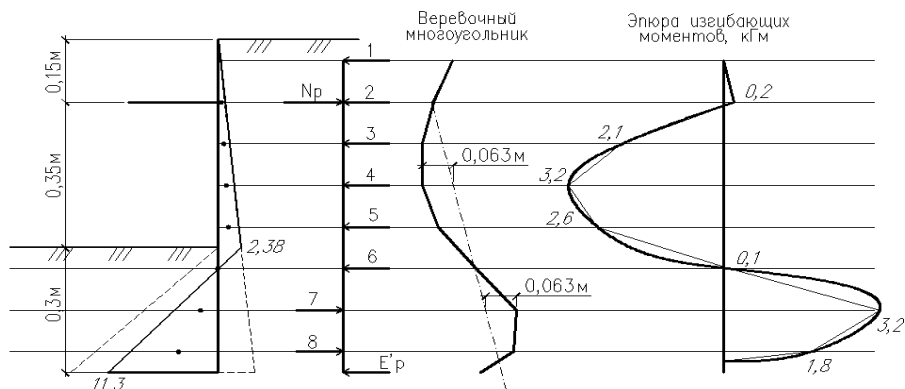


Рис. 9. Результаты расчета шпунтовой стенки методом Блюма-Ломейера при глубине «котлована» 50 см (V этап)

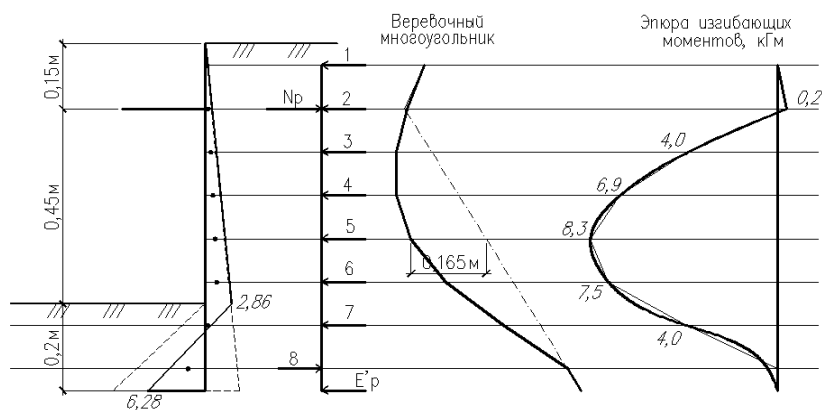


Рис. 10. Результаты расчета шпунтовой стенки методом Блюма-Ломейера при глубине «котлована» 60 см (VI этап)

Установлено, что до последнего (VI-го) этапа разработки котлована, когда глубина заделанной части стенки еще достаточно большая, вид эпюры изгибающих моментов согласуется с экспериментальными данными, за исключением небольших отклонений значений расчетных моментов в большую сторону (до 20 %). Меньшее значение изгибающих моментов в эксперименте объясняется тем, что при деформировании шпунтовой стенки в сторону котлована грунт за стенкой разуплотняется (рис. 4), что приводит к снижению активного давления грунта. Это явление отмечается в работах и других авторов.

На последнем этапе откопки грунта в котловане, согласно *расчетам*, стенка в нижней части перестает работать как заделанная в грунте конструкция. Эпюра моментов принимает вид, схожий с эпюрой, полученной расчетом по методу маятника (рис. 10). Что касается результатов *экспериментов*, то на этом этапе вид эпюры изгибающих моментов принципиально не отличается от картины предыдущего этапа. В заделанной части изгибающие моменты не только не уменьшаются, а даже увеличиваются (см. рис. 3).

Следует отметить, что при расчете методом Блюма-Ломейера для того, чтобы ограждающая конструкция ниже дна котлована работала как защемленный элемент (как получено при эксперименте), она должна иметь относительно большую глубину заделки, ниже дна котлована. К примеру, для модели шпунтовой стенки, принятой при проведении эксперимента, глубина заделки на VI этапе при расчете этим методом должна быть не менее 40 см. При фактической же глубине заделки в 20 см, согласно расчету методом Блюма-Ломейера, она не должна (или не может) работать как конструкция, защемленная ниже дна котлована (рис. 10).

Тем не менее, результаты экспериментов показывают, что в шпунтовой стенке ниже дна котлована изгибающие моменты меняют знак даже при «недостаточной» глубине заделанной части, а в грунте за нижней частью стенки возникают зоны уплотнения (рис. 3, 4). Иначе говоря, нижняя часть стенки перемещается не в сторону котлована, а в обратную сторону,

уплотняя тем самым ограждаемый грунт. В такой ситуации неизбежно возникновение точки поворота в нижней части стенки. Как показали эксперименты, при использовании гибких шпунтовых стен такая точка существует и находится чуть ниже уровня дна котлована.

Анализ результатов расчета по двум вышеназванным методам показал, что в них не находит отражения влияние изгибной жесткости шпунтовых стен на картину напряженно-деформированного состояния самих стенок и грунтового массива. Например, при расчете методом маятника ограждающая стенка рассматривается как абсолютно жесткая конструкция, которая поворачивается относительно точки крепления распорки без изгиба. В методе Блюма-Ломейера стенка рассматривается как изгибаемая, но, тем не менее, изгибная жесткость стенки при определении усилий, возникающих в стенке и грунтовом массиве, не используется. Вероятно, по этой причине значения изгибающих моментов в сечениях стенки, полученные при расчете этими методами, существенно отличаются от полученных экспериментальным путем.

Кроме этого, основным недостатком, присущим рассмотренным методам расчета шпунтовых стенок, является допущение о том, что пассивное давление, начиная со дна котлована, бесконечно увеличивается с глубиной независимо от активного давления, и что оно возникает только со стороны котлована. Однако следует отметить, что пассивное (точнее, «реактивное») давление должно зависеть от величины активного давления и возникать только как реакция на горизонтальные смещения грунта от воздействия активного давления или же иного воздействия (естественно, не превышая при этом определенного предельного значения). В вышерассмотренных методах вместо определения реактивного давления грунта определяется предельное давление, которое грунт в состоянии воспринимать, и оно прикладывается со стороны котлована как нагрузка на стенку.

Возможно, при использовании жестких шпунтовых стен такое допущение не приводит к большим погрешностям, но при относительно гибких стенках, как показали эксперименты, оно искажает реальную картину напряженно-деформированного состояния стенки и грунтового массива.

Из всего вышеизложенного следует, что при применении относительно гибких шпунтовых стенок деформации изгиба стенки и, соответственно, вызванные ими деформации уплотнения и разуплотнения грунта вносят существенные коррективы в работу конструкции в предельном состоянии.

Таким образом, проведенные в данной работе лабораторные исследования работы гибкой шпунтовой стенки, закрепленной распорками, позволили составить представление о происходящих в процессе разработки грунта изменениях напряжений и деформаций как в стенке, так и в грунтовом массиве по мере разработки грунта из котлована.

Обобщая все вышеизложенное, можно сказать, что существующие методики применительно к расчету шпунтовых стенок с распорками, основанные на теории Кулона, дают завышенные величины усилий в сечениях стенки, что неизбежно приводит к излишним запасам и, следовательно, к перерасходу материалов. Например, для опытного образца шпунтовой стенки расчетные значения изгибающих моментов на разных этапах разработки грунта превышают экспериментальные от 1,3 до 2 раз. Однако для выявления более конкретных зависимостей понижающего коэффициента от деформативных характеристик стенки и грунта необходимо продолжить исследования в этой области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дидух Б.И., Иоселевич В.А. Смещение ограждающей стенки в процессе выемки котлована // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1996, № 6. – С. 2-6.
2. ВСН 136-78 «Инструкция по проектированию вспомогательных сооружений и устройств для строительства мостов».
3. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с. (Справочник проектировщика).

## REFERENCES

1. Didukh B.I., Ioselevich V.A. Displacement of the enclosing walls during excavation pit // Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov, 1996, № 6. – P. 2-6.
2. VSN 136-78 «Instruction on designing the auxiliary buildings and device for construction bridges».
3. Bases, foundations and underground structures / Under the general editorship of E.A. Sorochan and Y.G. Trofimenkov. – M.: Stroyizdat, 1985. – 480 p. (Reference book of the designer).