

## ТРАНСПОРТ

УДК 629.114.2:621.828.6

**Е. И. Берестов, д-р техн. наук, проф., А. В. Кулабухов**

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАССИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА НА ПОДПОРНУЮ СТЕНКУ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований пассивного давления грунта на подпорную стенку. Установлено, что ориентация сил трения, действующих на грунт, зависит от угла наклона подпорной стенки. Даны рекомендации по использованию полученных результатов при расчетах.

Методы расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку находят широкое применение при расчетах взаимодействия рабочего оборудования машин с грунтом [1].

Наиболее строгим в математическом отношении является метод, разработанный В. В. Соколовским [2]. Этот метод обеспечивает расчет подпорных стенок при активном и пассивном давлениях грунта по известным граничным условиям на засыпке и подпорной стенке. Граничные условия на засыпке задаются величиной приведенного давления и углом его отклонения, а на подпорной стенке — углом отклонения искомого давления. При расчетах этот угол обычно принимается равным углу внешнего трения грунта, а силы трения, действующие на грунт, направляются к вершине откоса.

Такое предположение требует уточнения, так как до начала разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения подпорная стенка проходит

некоторый путь вследствие сжимаемости грунта. Можно предположить, что направление смещения грунта по поверхности подпорной стенки до его разрушения в значительной степени будет зависеть от угла ее наклона. Это предположение требует экспериментальной проверки.

Для этого проведена серия экспериментов на установке для исследования резания грунта. Установка представляет собой контейнер с песком, одна из боковых сторон которого выполнена из стекла.

Основой для получения модели грунта служил мелкозернистый песок, размер фракций которого не превышал 2 мм. Грунт увлажнялся до естественной влажности и уплотнялся до определенной степени.

При помощи сдвигового прибора измеряли сцепление грунта, углы внутреннего и внешнего трения. Результаты этих измерений представлены в табл. 1.

Табл. 1. Физико-механические свойства грунта

Наименование показателей	Значение
Сцепление грунта $c$ , кПа	4
Угол внутреннего (грунта по грунту) трения $\rho$ , град	28
Угол внешнего (грунта по металлу) трения $\omega$ , град	25

Общий вид установки изображен на рис. 1. В качестве подпорной стенки 1 использовалась металлическая пластина шириной 100 мм и высотой 60 мм, которая устанавливалась на подвеске 2 при помощи специальных кронштейнов 3, шарнирно крепящихся к подвижной тележке 4. Подвеска обеспечивает установку подпорной стенки под углами до 75 град в каждую сторону относительно ее вертикального положения. Тележка передвигалась

по направляющим 5, которые исключают ее перемещение в вертикальной плоскости. Привод тележки осуществлялся при помощи лебедки 6 посредством каната 7. Задний кронштейн 3 взаимодействует с упругой балочкой 8, что позволяет измерять горизонтальную силу, действующую на подвеску. Деформация балочки фиксируется индикатором 9, шкала которого предварительно была протарирована в ньютонах.

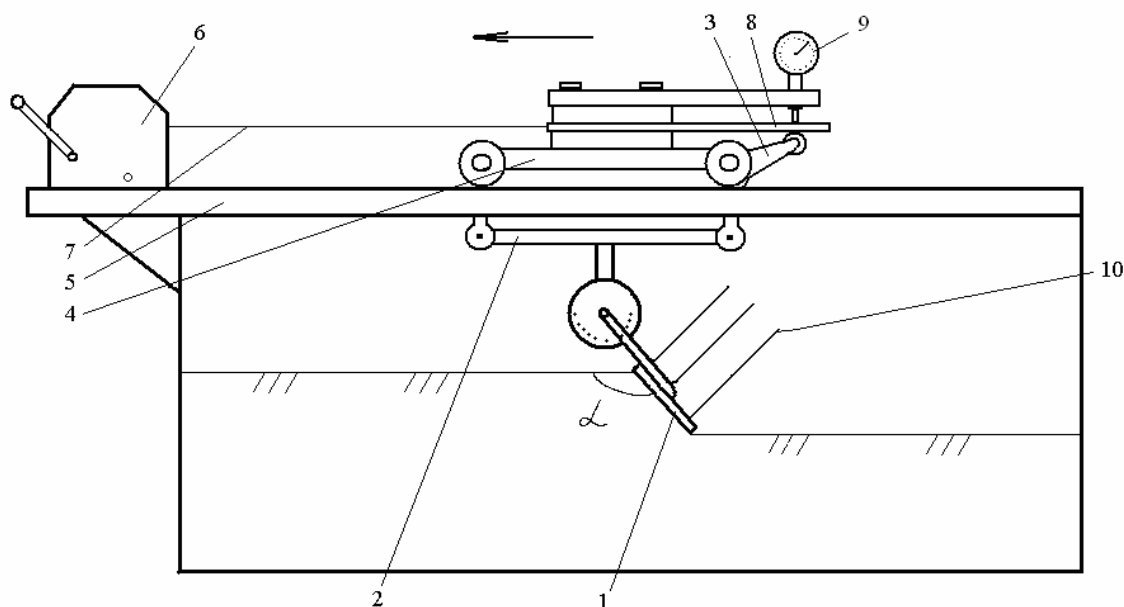


Рис. 1. Схема установки для исследования резания грунтов

В подпорной стенке 1 просверлены отверстия малого диаметра для установки специальных указателей — флюгеров 10. Отверстия просверлены равномерно по всей поверхности в три ряда по четыре отверстия в каждом, что обеспечивало лучшее наблюдение за перемещением грунта по всей поверхности подпорной стенки. Для достаточной подвижности флюгеров, поперечное сечение каждого из отверстий выполнялось в виде усеченного конуса, расположенного с уклоном к рабочей поверхности подпорной стенки. Использование в качестве флюгеров стержней для шариковых ручек, имеющих меньший диаметр наконечника, исключало их перемещение вдоль оси отверстия.

Порядок проведения опытов заключался в следующем. В подготовленном грунте выкапывался приямок, в который устанавливалась подпорная стенка. Одна из боковых сторон которой прилегала вплотную к стеклянной стенке установки, вторая сторона подпорной стенки перемещалась непосредственно в грунте. Этим исключалось боковое расширение грунта и обеспечивалось визуальное наблюдение через стекло за его разрушением при перемещении подпорной стенки. Затем осуществлялась подгонка грунта к поверхности подпорной стенки при помощи скребков таким образом, чтобы не нарушить структуру грунта.

После этого тележка с подпорной стенкой устанавливалась в рабочее положение, при котором поверхность подпорной стенки соприкасалась с грунтом. Через отверстия вставлялись флюгеры перпендикулярно поверхности подпорной стенки таким образом, чтобы их заостренные концы погружались в грунт перед подпорной стенкой на расстояние около 3 мм. Это обеспечивалось соотношением диаметров отверстий и погружаемой части флюгеров. Затем с малой скоростью осуществлялось перемещение тележки посредством ручного привода лебедки, что позволяло наблюдать все этапы разрушения грунта и снимать их видеокамерой, а также контролировать показания индикатора и положение флюгеров. Для замеров положения площадок скольжения тележка останавливалась по мере необходимости.

При плавном продвижении подпорной стенки на грунт велось наблюдение за поведением флюгеров. По отклонению свободных концов флюгеров можно судить о направлении движения грунта вдоль поверхности подпорной стенки, а следовательно, и о направлении сил трения грунта о подпорную стенку.

На рис. 2, а показано положение флюгеров и подпорной стенки с малым углом наклона перед началом эксперимента. При перемещении подпорной стенки свободные концы флюгеров отклоняются вниз и остаются в этом положении вплоть до появления площадок скольжения в грунте (рис. 2, б). Это свидетельствует о том, что в момент разрушения грунт смещается по поверхности подпорной стенки к ее вершине. При дальнейшем перемещении подпорной стенки флюгеры не изменяют своего положения. Это значит, что грунт не изменяет своего направления движения и после появления площадок скольжения. Следовательно, в момент разрушения грунта силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, направлены к основанию откоса.

Аналогичным образом исследовалась подпорная стенка с большим углом

наклона. На рис. 2, в показано положение флюгеров и подпорной стенки с большим углом наклона перед началом эксперимента. При продвижении такой подпорной стенки на грунт свободные концы флюгеров отклоняются вверх по сравнению со своим исходным положением. Это свидетельствует о том, что силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, направлены к вершине откоса вплоть до разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения (рис. 2, г).

При дальнейшем продвижении подпорной стенки на грунт начинается процесс, напоминающий резание грунта. В грунте будут появляться новые площадки скольжения. Причиной их появления будет давление, действующее на грунт со стороны ранее отделенных элементов грунта. При определенных условиях такие элементы, примыкающие к подпорной стенке, начинают смещаться в сторону дневной поверхности грунта. Этот момент фиксируется флюгерами, свободные концы которых начинают отклоняться вниз к основанию подпорной стенки.

У промежуточных подпорных стенок (рис. 2, д) до разрушения грунта и появления площадок скольжения флюгеры не отклоняются ни в какую сторону. Очевидно, что и грунт не смещается относительно поверхности подпорной стенки при разрушении. После разрушения грунт вытесняется подпорной стенкой на дневную поверхность, и свободные концы флюгеров отклоняются вниз (рис. 2, е).

Проведенные эксперименты свидетельствуют, что методы расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку при больших углах ее наклона требуют уточнения. Проведем расчет пассивного давления грунта на подпорные стенки по методу В. В. Соколовского с учетом особенностей, вытекающих из результатов проведенных экспериментов.

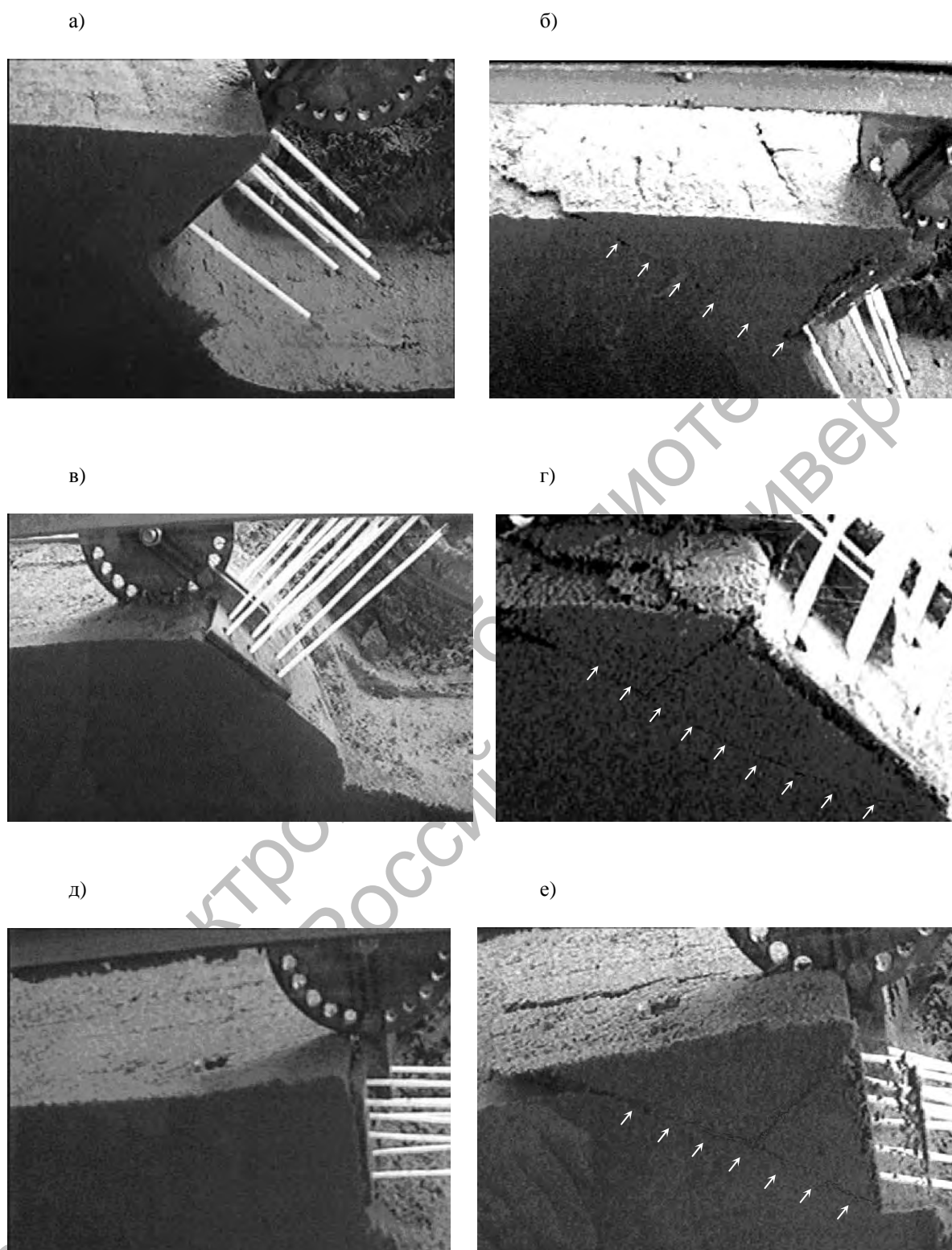


Рис. 2. Положение площадок скольжения и флюгеров на подпорной стенке: а, б – с малым углом наклона; в, г – с большим углом наклона; д, е – с промежуточным углом (а, в, д – до эксперимента; в, г, е – в момент разрушения грунта)

При расчетах использовалась следующая методика. Ступенчато увеличивалось действительное давление, действующее на грунт со стороны подпорной стенки, определялись величина и угол отклонения приведенного давления, и полученное значение давления сравнивалось с величиной разрушающего давления [3], имеющего такой же угол отклонения от нормали к подпорной стенке. Когда разрушение происходило, методом последовательных приближений определялось значение разрушающего давления с заданной степенью точности. Такая методика расчета вытекает из того, что действительное давление оказывает влияние на два параметра граничных условий – как на величину, так и на угол отклонения приведенного давления. Расчет подпорных стенок с малым углом наклона не изменяется. Для этих подпорных стенок угол отклонения действительного давления будет равен углу внешнего трения грунта, а силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, направлены к его основанию. Поскольку приведенное давление является геометрической суммой действительного давления и давления связности, его величина находится по расчетным схемам В. В. Соколовского при помощи итерационных методов. Область существования подпорных стенок с малым углом наклона ограничивается условием  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} - \omega$ , вытекающим из результатов экспериментов.

Соответственно подпорные стенки с большим углом наклона будут существовать при  $\alpha > \frac{\pi}{2} + \omega$ . Действительное давление, действующее на грунт со стороны подпорных стенок с большим углом наклона, также отклонено под углом внешнего трения, но силы трения будут направлены к вершине откоса. Это изменяет и направление приведенного давления, которое также будет направлено к вершине откоса (рис. 3, д). Поскольку от направления приведенного давления зависит пространственная ориентация зоны предельно напряженного состояния грун-

та  $OA_2B$ , примыкающей к подпорной стенке, расчетная схема для такого случая изменится. В первую очередь, уменьшается общая зона разрушения грунта  $OA_0B$ . Это происходит по следующим причинам. Изменение направления главных напряжений в зоне  $OA_2B$  приводит к значительному уменьшению промежуточной зоны  $OA_1A_2$  из-за поворота характеристики  $OA_2$  при неизменном положении характеристики  $OA_1$ . При этом уменьшается и длина характеристики  $OA_2$ , а с нею – характеристики  $OA_1$  и всей зоны  $A_0OA_1$ , примыкающей к засыпке. Это хорошо видно из рис. 2, г. Положение линий скольжения на этом рисунке хорошо согласуется с предложенной расчетной схемой на рис. 3, д. Очевидно, что и величина приведенного давления, действующего на подпорную стенку, существенно изменится. Для ее определения по-прежнему необходимо использовать итерационные методы с учетом приведенных выше особенностей расчета.

В диапазоне углов  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$

расположены промежуточные подпорные стенки (рис. 3, а, б, в). Проведенные эксперименты показывают, что в момент разрушения отсутствует смещение грунта относительно поверхности подпорной стенки. Для таких подпорных стенок угол отклонения действительного давления будет меньше угла внешнего трения грунта. Можно считать, что действительное давление действует в направлении перемещения подпорной стенки, а его угол отклонения определяется по формуле

$$\delta = \left| \alpha - \frac{\pi}{2} \right| \leq \omega.$$

При угле наклона подпорной стенки  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  давление, действующее со

стороны подпорной стенки на грунт, будет нормальным. При углах наклона подпорной стенки  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2}$  касательные напряжения направлены к основанию откоса ОВ (рис. 3, б), а при  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$  касательные напряжения будут направ-

лены к вершине откоса ОВ (рис. 3, в). Как видно из схем, и в этом случае при одних и тех же углах наклона подпорной стенки размеры зон разрушения, полученные разными способами, значительно отличаются друг от друга, а центральная зона  $A_1OA_2$  и вовсе исчезает.

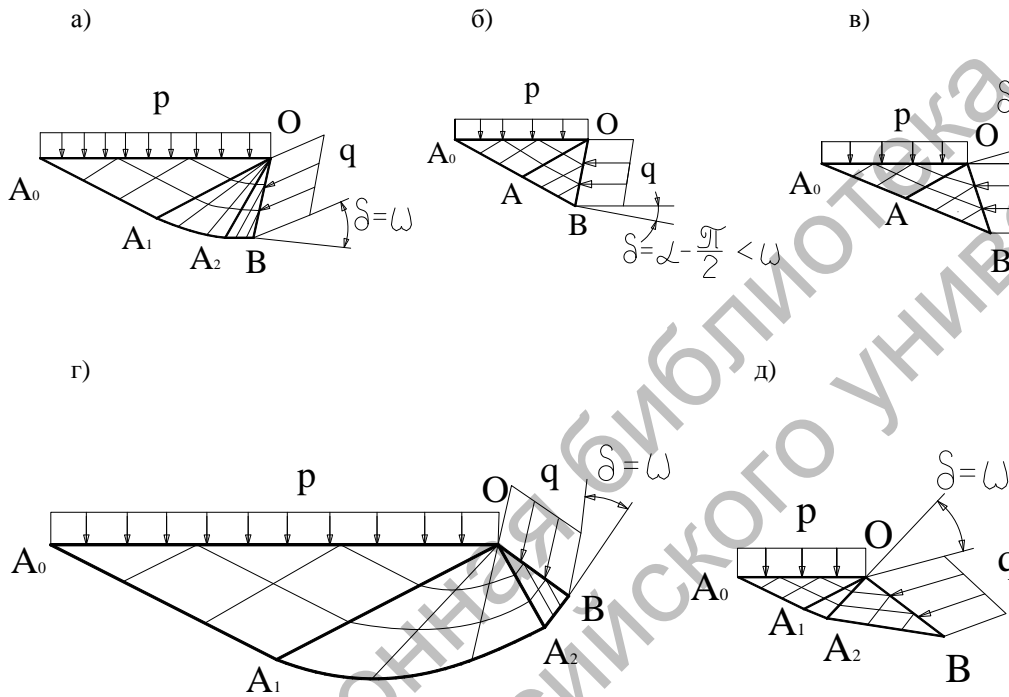


Рис. 3. Сетки линий скольжения: а, б, в – для промежуточных подпорных стенок; г, д – подпорных стенок с большим углом наклона (а, г – при направлении сил трения к основанию откоса по традиционной схеме; б, в, д – с учетом результатов экспериментов при тех же условиях); р, q – действительные давления действующие соответственно на засыпку и на грунт со стороны подпорной стенки

На рис. 4 представлены результаты вычислений по приведенной методике применительно к условиям эксперимента. Из рисунка видно, что графики содержат три участка. На первом участке, при угле наклона подпорной стенки

$$\alpha < 60^\circ = \frac{\pi}{2} - \omega,$$

силы трения, действующие на грунт, направлены к основанию откоса грунта; действительное давление отклонено от

нормали под углом внешнего трения в сторону отрицательного направления отсчета, а приведенное давление отклонено в ту же сторону под углом  $\delta$ . На третьем участке, при угле наклона

$$\alpha > 120^\circ = \frac{\pi}{2} + \omega,$$

силы трения направлены к вершине откоса, а действительное и приведенное давления отклонены от нормулы в сторону положительного направления от-

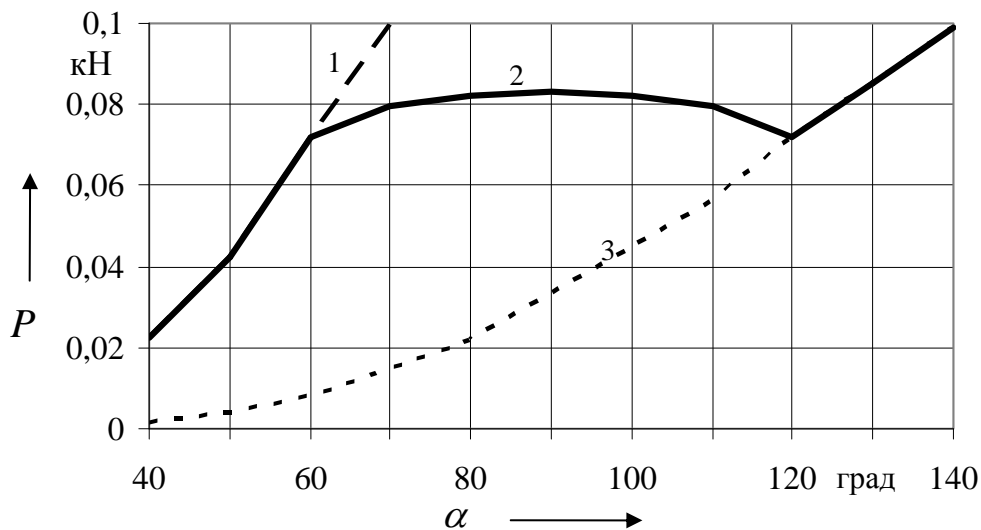
счета углов. Промежуточный участок для подпорных стенок, имеющих угол наклона в пределах

$$\frac{\pi}{2} - \omega = 60^\circ < \alpha < 120^\circ = \frac{\pi}{2} + \omega,$$

является переходным и связывает крайние участки. Характерным для этого уча-

стка является то, что при отсутствии скольжения грунта по подпорной стенке в момент его разрушения угол отклонения действительного давления меньше угла внешнего трения, то есть  $\delta \leq \omega$ , а при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  этот угол и вовсе равен нулю.

а)



б)

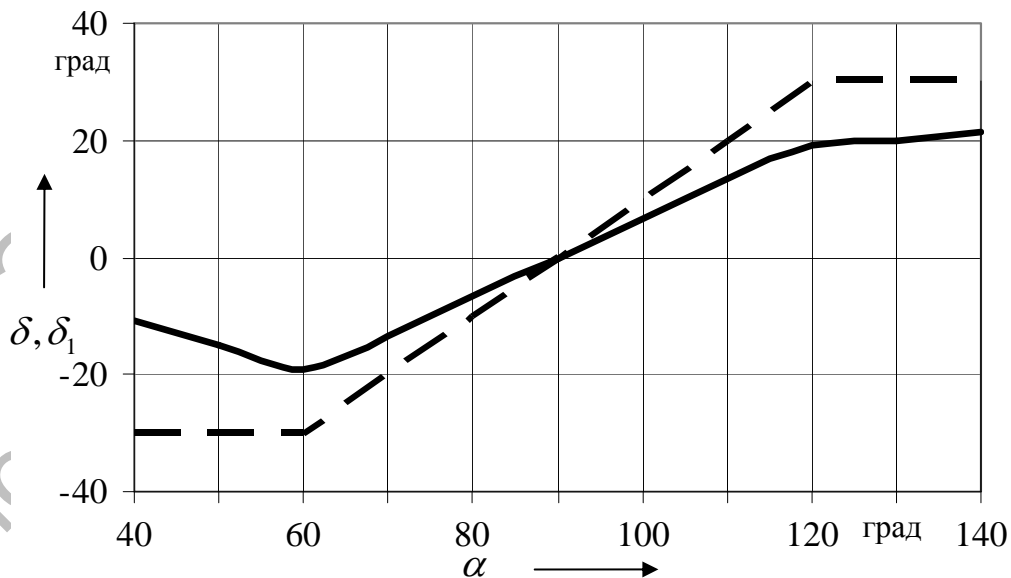


Рис. 4. Зависимости от угла наклона подпорной стенки: а – горизонтальной силы сопротивления грунта внедрению в него подпорной стенки; б – углов отклонения действительного (штриховая линия) и приведенного (сплошная линия) давлений, действующих на подпорную стенку; 1, 3 – рассчитанные по типовым схемам; 2 – с учетом результатов экспериментальных исследований

Справедливость приведенных рассуждений и расчетов подтверждается и полученными экспериментальными значениями горизонтальной силы сопротивления грунта при надвигании на него подпорной стенки, которые дают качественную картину, соответствующую графику, изображенному на рис. 4, а. Экспериментальные значения силы получены с учетом сопротивления грунта сдвигу по одному из торцов подпорной стенки и трения грунта о стекло с другой, что не позволяет провести количественный сопоставительный анализ. К сожалению, получить значение силы в «чистом» виде экспериментальным путем не удалось. Попытки использовать для этой цели приямки, выкопанные по краям торцов подпорной стенки по пути ее движения, не увенчались успехом из-за бокового движения грунта, которое при малой ширине подпорной стенки существенно изменяет картину разрушения.

Полученные результаты свидетель-

ствуют о необходимости учета особенностей взаимодействия подпорной стенки с грунтом при разных углах ее наклона при расчетах пассивного давления грунта. Таким образом, предложенная методика расчета позволяет в значительной степени уточнить величину пассивного давления грунта действующего на подпорную стенку. Характер разрушения грунта, наблюдаемый при экспериментах, позволяет заключить, что эта методика соответствует реальным физическим процессам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баловнев, В. И.** Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов / В. И. Баловнев. – М.: Росвузиздат, 1963. – 95 с.
2. **Соколовский, В. В.** Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – 3-е изд. – М.: Физмат, 1960. – 243 с.
3. **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Изв. вузов. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102-107.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 04.05.2006

**E. I. Berestov, A. V. Kulabukhov**  
**Experimental research into**  
**the soil passive pressure on**  
**the retaining wall**  
Belarusian-Russian University

The paper presents the results of experimental research into the soil passive pressure on the retaining wall. It was found that the orientation of friction forces acting on the soil depends on the deflection angle of the retaining wall. Some recommendations on using obtained results for analysis are given here.

УДК 629.067

**О. В. Билык, Г. В. Бочкарев, В. А. Ким, д-р техн. наук, проф., И. С. Сазонов,**  
**д-р техн. наук, проф., А. А. Метто, Н. А. Коваленко, канд. техн. наук, доц.**

#### **СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА** **ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОЙ** **МАШИНЫ**

В статье излагается электронная схемотехническая реализация алгоритма управления новой системы активной безопасности (САБ) колесной машины на силовом анализе. Предлагаемый алгоритм управления САБ колесной машины реализован в макетном образце и прошел предварительные испытания.