

Е.И. Берестов докт. техн. наук, проф., А.В. Кулабухов, канд. техн. наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРУШЕНИЮ ГРУНТА ПОДПОРНОЙ СТЕНКОЙ

Методы расчета пассивного давления грунта на подпорную стенку находят широкое применение не только в строительстве, но и при расчетах взаимодействия рабочего оборудования машин с грунтом. Они нашли широкое применение как при расчете сопротивлений грунта резанию [1, 2], так и при расчете взаимодействия грунтозацепов гусеничных движителей с грунтом [3].

Для расчета необходимо знать граничные условия на засыпке и подпорной стенке [4]. Вычисления возможны, если на засыпке будут известны давление, действующее на нее, и угол его отклонения от нормали к поверхности засыпки, а на подпорной стенке достаточно знать только угол отклонения искомого давления от нормали к поверхности подпорной стенки. Обычно принимается, что угол отклонения приведенного давления от нормали к подпорной стенке, используемый при расчетах, равен углу трения грунта о подпорную стенку (углу внешнего трения), а силы трения, приложенные к грунту, направляются к его основанию [1, 4]. Такие предположения требуют уточнения по нескольким причинам.

Во-первых, угол отклонения приведенного давления, действующего на грунт со стороны подпорной стенки, зависит не только от угла внешнего трения, но и от величины действительного давления, поскольку является геометрической суммой действительного давления и давления связности.

Во-вторых, вследствие того, что до начала разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения подпорная стенка проходит некоторый путь вследствие сжимаемости грунта, то можно предположить, что направление смещения грунта по поверхности подпорной стенки до начала и в момент его разрушения будет зависеть и от угла ее наклона.

И если учет давления связности не вызывает затруднений при расчетах приведенного давления за счет использования итерационных методов, то последнее предположение требует экспериментальной проверки.

Для этого проведена серия экспериментов на установке для исследования резания грунта (рис. 1). Установка представляет собой контейнер с грунтом, у которого передняя боковая стенка 1 выполнена из стекла. На контейнере установлена тележка 2, перемещаемая по направляющим 3 посредством тросика 4 при помощи барабана 5, вращаемого вручную. На тележке при помощи специальных кронштейнов установлена подвеска 6. Задний кронштейн 7 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. Подпорная стенка 10 закреплена на подвеске с возможностью установки под углами до 75 градусов в каждую сторону относительно ее вертикального положения.

Подпорную стенку имитировала металлическая пластина шириной 100 мм и высотой 60 мм. В пластине просверлены отверстия малого диаметра для установки специальных указателей – флюгеров 11. 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 обеспечения достаточной подвижности флюгеров, поперечное сечение каждого из отверстий выполнялось в виде усеченного конуса, расположенного с уклоном к рабочей поверхности подпорной стенки. В качестве флюгеров использовались обычные стержни шариковых ручек.

Исследования проводились на грунте, основу которого составлял мелкозернистый песок, к которому добавлено незначительное количество суглинка для увеличения связности. Перед экспериментами грунт увлажнялся до естественной влажности и уплотнялся до определенной степени. При помощи сдвигового прибора измерялись угол внутреннего трения ρ и сцепление c грунта, которые соответственно составляли $\rho=30^\circ$ и $c=4$ кПа. Угол внешнего трения ω также составлял 30 градусов.

Порядок проведения опытов заключался в следующем. В подготовленном грунте выкапывался приямок, в который устанавливалась подпорная стенка одной боковой стороной вплотную к стеклянной стенке контейнера, вторая сторона подпорной стенки перемещалась непосредственно в грунте. Этим исключалось боковое расширение грунта и соответствующие ему перемещения флюгеров в горизонтальной плоскости и обеспечивалось визуальное наблюдение через стекло за характером разрушения грунта при надвигании на него подпорной стенки. Затем осуществлялась подгонка грунта к поверхности подпорной стенки при помощи скребков, что исключало нарушения структуры грунта и позволяло установить рабочую поверхность подпорной стенки вплотную к грунту по всей поверхности при разных углах ее наклона.

После этого тележка с подпорной стенкой устанавливалась в рабочее положение, при котором поверхность подпорной стенки соприкасалась с грунтом. Через отверстия вставлялись флюгеры перпендикулярно подпорной стенке 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. После этого осуществлялось перемещение тележки вручную с малой скоростью, что позволяло наблюдать все этапы разрушения и фиксировать их видеокамерой, а также контролировать показания индикатора и положение флюгеров. Для замеров положения площадок скольжения тележка останавливалась по мере необходимости.

По отклонению свободных концов флюгеров можно судить о направлении движения грунта вдоль поверхности подпорной стенки, а, следовательно, и о направлении сил трения между подпорной стенкой и грунтом на разных стадиях разрушения грунта.

При перемещении подпорной стенки с малым углом наклона концы флюгеров сразу же начинают отклоняться вниз и остаются в этом положении вплоть до разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения (рис. 2,а). Это свидетельствует о том, что непосредственно в момент разрушения смещение грунта относительно подпорной стенки направлено в сторону верхней ее грани. 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, непосредственно в момент разрушения грунта силы трения, действующие на него со стороны подпорной стенки, направлены к основанию откоса, как это и принято.

Аналогичным образом исследовалась подпорная стенка с большим углом наклона (рис. 2,в). При надвигании такой подпорной стенки на грунт концы флюгеров сразу же начинают отклоняться вверх по сравнению со своим исходным положением и остаются в этом положении вплоть до появления в грунте площадок скольжения. Это свидетельствует о том, что силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, направлены к вершине откоса и действуют в этом направлении вплоть до разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения.

Интересно, что при дальнейшем надвигании такой 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 элементы грунта, примыкающие непосредственно к подпорной стенке, начинают смещаться в сторону дневной поверхности массива грунта. Этот момент фиксируется флюгерами, свободные концы которых начинают отклоняться в противоположную сторону - вниз к основанию подпорной стенки.

У промежуточных подпорных стенок до начала разрушения грунта флюгеры не отклоняются ни в ту, ни в другую сторону. Очевидно, что и грунт не смещается относительно поверхности подпорной стенки вплоть до его разрушения и появления в нем площадок скольжения.

При дальнейшем перемещении подпорной стенки грунт, примыкающий к ее поверхности, начинает вытесняться вверх, а свободные концы флюгеров отклоняются вниз. Такой момент изображен на рис. 2,д, на котором зафиксировано смещение вверх призмы грунта, примыкающей к вертикальной подпорной стенке, и отклонение концов флюгеров при пере-

мещении последней на некоторое расстояние после появления в грунте площадок скольжения.

Приведенные выше рассуждения подтверждаются положениями линий скольжения, зафиксированными на фотографиях (рис. 2).

Как известно [3], зависимость, связывающая угол отклонения приведенного давления δ , действующего на поверхность рассматриваемой области, с углом φ между направлением наибольшего главного напряжения и поверхностью рассматриваемой зоны имеет вид

$$\varphi = (1 - \kappa) \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\kappa\Delta - \delta), \quad (1)$$

где $\kappa = \pm 1$ (плюс при пассивном, минус при активном напряженном состоянии грунта),

$$\Delta = \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho}.$$

Применительно к условиям эксперимента, когда поверхность засыпки находится под воздействием лишь всестороннего нормального давления связности $H = c \operatorname{ctg} \rho$, где c – удельное сцепление грунта; ρ – угол внутреннего трения, уравнение (1) для пассивной зоны, примыкающей к засыпке, при $\kappa = +1$ и $\delta = 0$ примет вид

$$\varphi_1 = 0.$$

Поскольку угол наклона линий скольжения к направлению наибольшего главного напряжения будет определяться зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2},$$

то в данном случае, при $\varphi_1 = 0$, линии скольжения будут наклонены к поверхности засыпки под углами $\pm 30^\circ$.

Для активной зоны, примыкающей к подпорной стенке, из того же уравнения (1) при $\kappa = -1$ получим относительно поверхности подпорной стенки

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta + \delta).$$

Относительно горизонтальной оси будем иметь

$$\bar{\varphi}_2 = \varphi_2 - (\pi - \alpha) = \alpha - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta + \delta),$$

где α – угол наклона подпорной стенки.

Расчеты показывают, что в данных условиях, для подпорной стенки с малым углом наклона ($\alpha=45^0$), углы δ и Δ будут соответственно равны $-13,4^0$ и $-27,6^0$ (знак «минус» учитывает направление отсчета углов). При этом угол между направлением наибольшего главного напряжения и поверхностью подпорной стенки будет равен $\varphi_2=110,5^0$, что по отношению к горизонтали составит $\bar{\varphi}_2 = -24,5^0$. Соответственно, линии скольжения будут наклонены к горизонтали под углами $5,5^0$ и $-54,5^0$. По этим данным построено расчетное графическое изображение площадок скольжения для этого случая (рис. 2,б). Из этого рисунка видно, что расчетное положение, как это и вытекает из известных положений теории, хорошо согласуется с действительным положением (рис. 2,а) площадок скольжения, зафиксированным видеокамерой.

Для подпорной стенки с большим углом наклона ($\alpha=135^0$) картина будет несколько другой. Если, в соответствии с отклонением свободных концов флюгеров, принять, что силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, будут направлены в сторону вершины откоса, расчетные значения углов δ и Δ будут соответственно равны 19^0 и $40,6^0$. В соответствии с этим угол между направлением наибольшего главного напряжения и поверхностью подпорной стенки будет равен $\varphi_2=60,2^0$, а по отношению к горизонтали этот угол будет равен $\bar{\varphi}_2 = 15,2^0$. Угол наклона площадок скольжения к горизонтали в таком случае составит $45,2^0$ и $-14,8^0$ соответственно. Сопоставление полученных расчетным путем значений углов наклона площадок скольжения с экспериментальными значениями (рис. 2,в и 2,г) позволяет сделать вывод о справедливости суждения о направлении сил трения, действующих со стороны подпорной стенки с большим углом наклона на грунт.

Аналогичным образом построены линии скольжения и для подпорной стенки с промежуточным углом наклона, для которой не наблюдалось смещения свободных концов флюгеров а, следовательно, движение грунта относительно подпорной стенки в момент его раз-

рушения отсутствует. При принятом ниже обосновании о действии сил трения для подпорной стенки с углом наклона $\alpha=90^0$ углы δ и Δ будут равны нулю, а это значит, что угол $\varphi_2=90^0$ и угол $\bar{\varphi}_2=0$, что видно из соответствующих формул. Естественно, что линии скольжения для зоны, примыкающей к подпорной стенке, будут наклонены к горизонтали под углами $\pm 30^0$. Сопоставление расчетной схемы с действительной картиной разрушения грунта (рис. 2,д и 2,е) подтверждает это положение. Таким образом, в момент разрушения грунта силы трения между грунтом и подпорной стенкой при $\alpha=90^0$ отсутствуют. Они появляются лишь при дальнейшем перемещении подпорной стенки, когда отделенный от массива грунт начинает вытесняться вверх, что и фиксируется свободными концами флюгеров, которые в этот момент начинают отклоняться вниз (рис. 2,д).

Проведенные эксперименты свидетельствуют, что направление сил трения между грунтом и подпорной стенкой изменяется при изменении угла наклона последней, и это обстоятельство необходимо учитывать при расчете пассивного давления грунта на подпорные стенки.

Проведем расчет пассивного давления грунта на подпорные стенки и покажем, как необходимо учитывать особенности, вытекающие из результатов проведенных экспериментов.

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, 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 оба параметра граничных условий – как на величину, так и на угол отклонения приведенного давления.

Расчет подпорных стенок с малым углом наклона не изменяется по сравнению с общепринятыми методами. Для таких подпорных стенок смещение грунта относительно подпор-

ной стенки наблюдается уже с самого начала ее перемещения. Угол отклонения действительного давления будет равен углу внешнего трения грунта, а силы трения, действующие со стороны подпорной стенки на грунт, направлены к его основанию. 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 условии $\alpha > \frac{\pi}{2} + \omega$. 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 действия приведенного давления, которое также будет направлено к вершине откоса (рис. 2,в). Поскольку от направления действия приведенного давления зависит пространственная ориентация зоны предельно-напряженного состояния грунта, примыкающей к подпорной стенке, изменятся и другие расчетные параметры, в том числе и величина разрушающего давления.

В диапазоне углов $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$ расположены промежуточные подпорные стенки.

Проведенные эксперименты показывают, что при перемещении подпорной стенки отсутствует смещение грунта относительно ее поверхности вплоть до момента разрушения и появления в грунте площадок скольжения. Для таких подпорных стенок угол отклонения действительного давления, действующего на ее поверхности, будет меньше угла внешнего трения грунта. Можно считать, что действительное давление действует в направлении перемещения подпорной стенки, а его угол отклонения определяется по формуле $\delta_d = \left| \alpha - \frac{\pi}{2} \right| \leq \omega$.

При угле наклона подпорной стенки $\alpha = \frac{\pi}{2}$ давление, действующее со стороны подпорной стенки на грунт, будет нормальным. При углах наклона подпорной стенки, находящихся в пределах $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2}$ касательные напряжения направлены к основанию откоса, а при

углах в пределах $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$ касательные напряжения будут направлены к вершине откоса.

На рисунке 3 представлены результаты вычислений по приведенной методике применительно к условиям эксперимента. Из рисунка видно, что графики содержат три участка. На первом участке ($\alpha < 60^0$) 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 δ . На третьем участке ($\alpha > 120^0$) силы трения направлены к вершине откоса, а действительное и приведенное давления отклонены от нормали в сторону положительного направления отсчета углов. Промежуточный участок (для подпорных стен, имеющих угол наклона в пределах $60^0 < \alpha < 120^0$) является переходным и связывает крайние участки. Характерным для этого участка является то, что при отсутствии скольжения грунта по подпорной стенке в момент его разрушения угол отклонения действительного давления меньше угла внешнего трения, а при $\alpha = 90^0$ этот угол и вовсе равен нулю.

Справедливость приведенных рассуждений и расчетов подтверждается и полученными экспериментальными значениями горизонтальной силы сопротивления грунта внедрению в него подпорной стенки, которые дают качественную картину, соответствующую графику, изображенному на рис. 3,а. Значения силы сопротивления 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 свидетельствуют о необходимости учета особенностей взаимодействия подпорной стенки с грунтовой средой, особенно при больших углах ее наклона, что характерно при расчетах взаимодействия грунтозацепов гусеничных движителей с грунтом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловнев В.И. Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов.– Росвузиздат, 1963. – 95 с.
2. Берестов Е.И. Сопротивление грунтов резанию. – В журн. «Известия Вузов. Строительство», 1997, N 10, с.102-107.
3. Берестов Е.И., Кулабухов А.В. Методика расчета параметров взаимодействия грунтозацепов гусеничных машин с грунтом. Строительные и дорожные машины, 2008, №3, с.46-49.
4. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. Издание третье.- М.: Физмат, 1960.- 243 с.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследований пассивного давления грунта на подпорную стенку. Установлено, что направление наибольших главных напряжений в зоне, примыкающей к подпорной стенке, зависит от угла наклона подпорной стенки. Даны рекомендации по использованию полученных результатов при расчетах.

Рисунки к статье

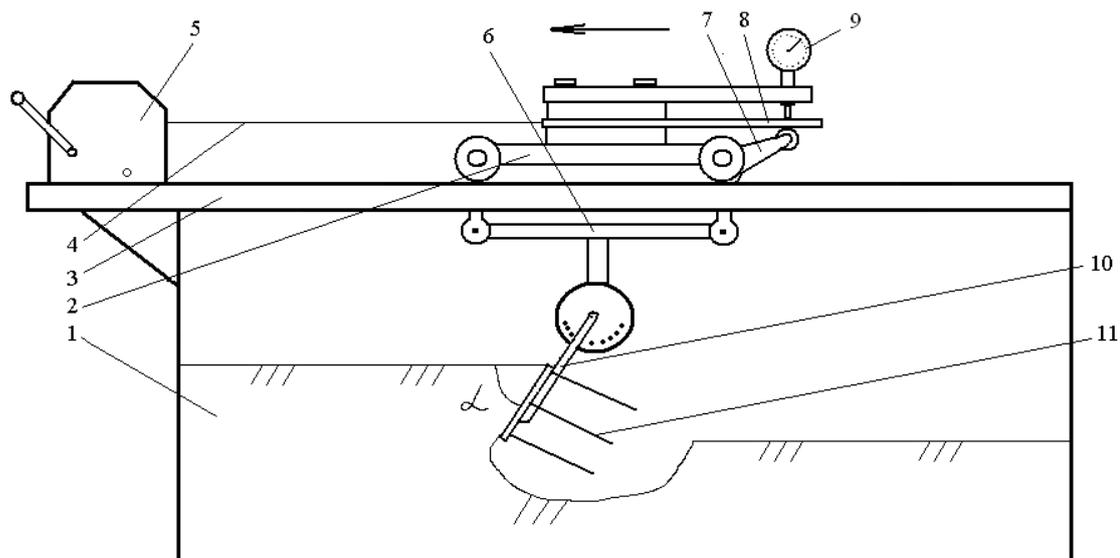
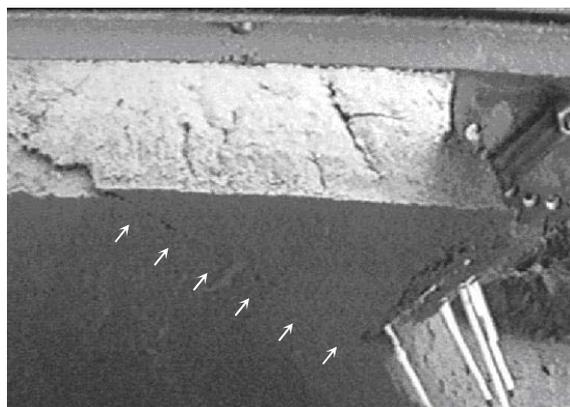
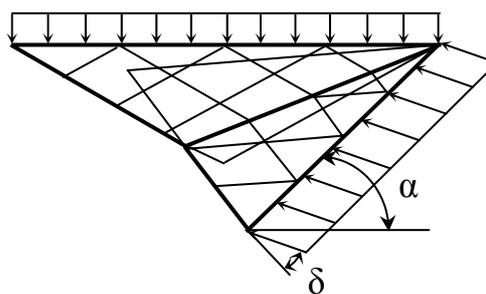


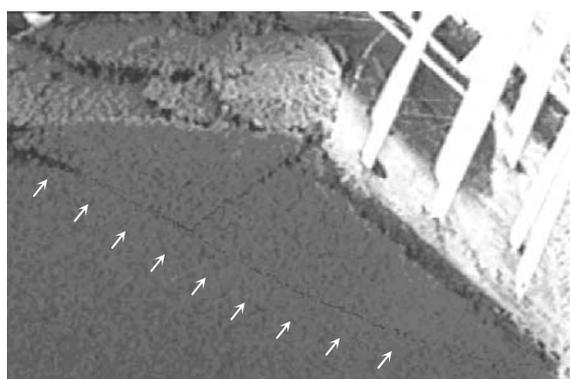
Рис. 1. Схема экспериментальной установки.



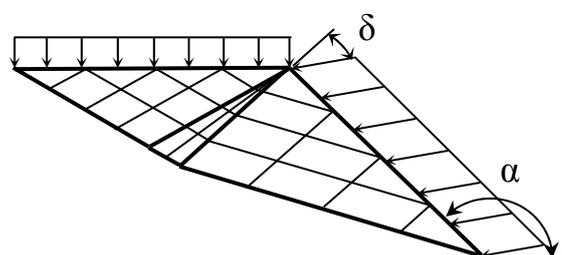
а)



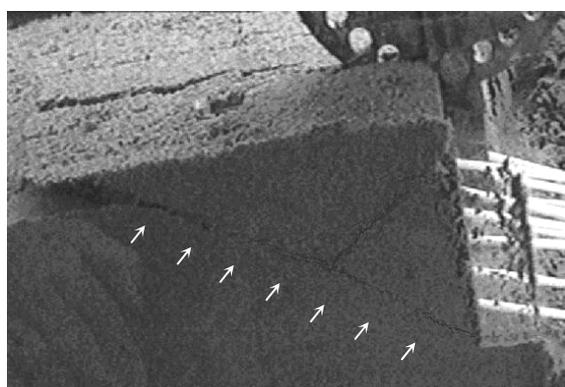
б)



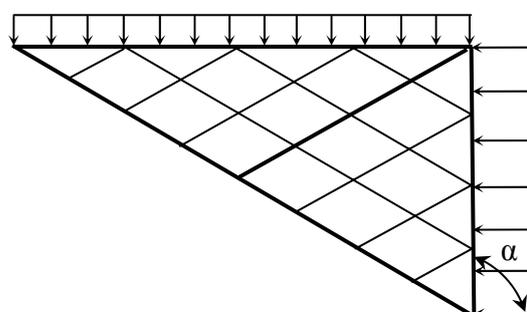
в)



г)

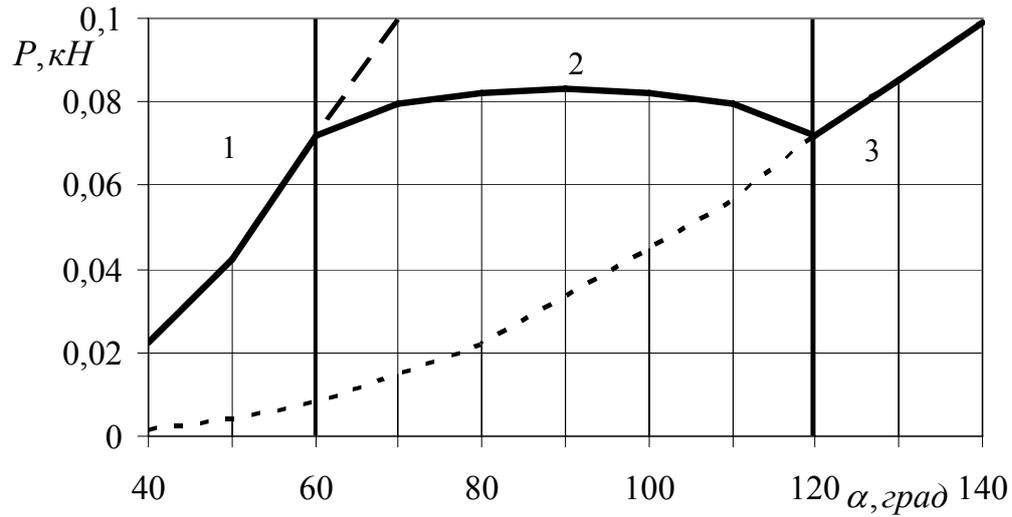


д)

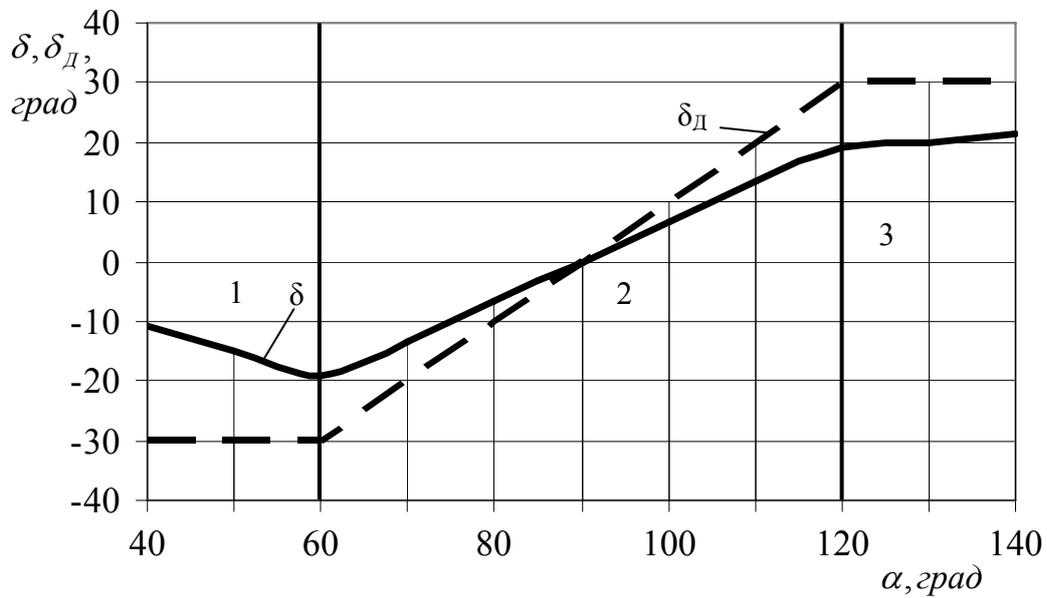


е)

Рис. 2. Положение флюгеров на подпорной стенке с малым углом наклона ($\alpha=45^0$) после начала ее перемещения и непосредственно в момент разрушения грунта и формирования в нем площадок скольжения (а); то же на подпорной стенке с большим углом наклона ($\alpha=135^0$) (в); отклонение флюгеров на подпорной стенке с промежуточным углом наклона ($\alpha=90^0$) при большом ее перемещении и положение площадок скольжения в грунте в момент его разрушения (д) а также теоретическое обоснование положения площадок скольжения (б, г, е).



a)



(б)

Рис. 3. Зависимость силы P сопротивления грунта внедрению в него подпорной стенки (а) и углов отклонения действительного δ_d и приведенного δ давлений, действующих на подпорную стенку, от угла ее наклона α (б): 1 – расчетная зона подпорной стенки с малым углом наклона; 2 - расчетная зона подпорной стенки с промежуточным углом наклона; 3 - расчетная зона подпорной стенки с большим углом наклона.