

УДК 624.137.5

UDC 624.137.5

**ВЛИЯНИЕ ОТПОРА ГРУНТА НИЗОВОГО СКЛОНА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТА ОПОЛЗНЯ СО СВАЯМИ ОДНОРЯДНЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ****INFLUENCE OF SOIL REACTION OF LOWER SLOPE ON LANDSLIDE SOIL INTERACTION WITH THE PILES OF SINGLE-ROW RETAINING CONSTRUCTIONS**

Деревенец Филипп Николаевич

Derevenets Philipp Nikolayevich

к.т.н.

Cand.Tech.Sci.

*ФГБОУ «Кубанский государственный аграрный университет», Краснодар, Россия**Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние грунта оползня при взаимодействии со сваями. Приведены зависимости предельных оползневых давлений из условия непродавливания грунта. Установлено, что учет пассивного отпора со стороны низового склона существенно повышает сопротивление конструкции продавливанию грунта

A stress-strain state of landslide soil during interaction with piles has been considered. The dependences of the critical landslide pressures from soil non-squeezing condition have been given. It was established, that account of passive reaction of lower slope essentially increases resistance of construction against soil squeezing

Ключевые слова: ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА, СВАЯ, ОТПОР ГРУНТА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТА, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТА СО СВАЯМИ

Keywords: ENGINEER PROTECTION, PILE, SOIL REACTION, STRESS-STRAIN STATE OF SOIL, SOIL-PILES INTERACTION

**ВВЕДЕНИЕ**

Противооползневая защита инженерных объектов на склонах часто производится с использованием железобетонных конструкций из буронабивных свай, заземленных в устойчивых породах и объединенных монолитным ростверком. С целью обеспечения устойчивости площадки строительства часто применяются удерживающие сооружения, расположенные со стороны низового склона.

Вопросами взаимодействия оползневого грунта укрепляемого склона с контрфорсными, в частности свайными, элементами удерживающих сооружений занимались Шадунц К.Ш. [1], Гинзбург Л.К. [2], Маций С.И. [3], Ито Т., Мацуи Т. [4], Адаши [5] и многие другие. Некоторые из исследований учитывают отпор грунта низового склона. Однако в силу принятых в них допущений (замена арочной формы зоны пластических деформаций на трапециевидную, жесткопластическая модель процесса продавливания, неучет трения грунта по свае и т.п.), они обеспечивают значительные по-

грешности при проектировании противооползневых удерживающих сооружений.

Автором проведены исследования [6], уточняющие и дополняющие результаты этих работ. С целью упрощения вычислений пассивный отпор грунта нижерасположенного склона в них в явном виде не учитывается. В результате несущая способность низового сооружения по продавливанию грунта получает заниженную оценку.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены численным методом с использованием пакета конечно-элементного анализа *PLAXIS*. Расчеты проводились с учетом следующих условий и допущений.

Моделировалась работа однорядной свайной конструкции, предназначенной для удержания вышерасположенного склона без подрезки со стороны низового склона. Рассматривалась плоская задача – осесимметричный фрагмент бесконечно протяженного сооружения в горизонтальной плоскости (рисунок 1). Закрепление свай принято жестким. Поведение грунта описывалось упругой, идеально пластической моделью Кулона – Мора. Предельное давление грунта на сооружение  $q_{\max}$  из условия непродавливания между сваями учитывалось как разница давлений грунта перед свайным сооружением ( $p_a$ ) и за ним ( $p_b$ ).

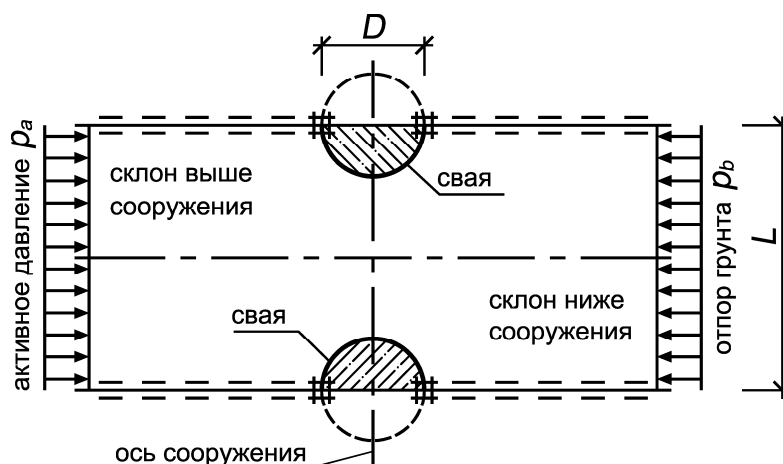


Рисунок 1 – Расчетная схема модели продавливания грунта между сваями

В рамках средств используемой программы сваи в расчетной модели представлены одной из симметричных половин «тоннеля» круглого сечения. Материалу обделки тоннелей-свай заданы достаточно высокие значения изгибной и нормальной жесткости, позволяющие пренебречь их собственными деформациями. Для моделирования работы грунта на контакте со сваями с возможностью проскальзывания или отрыва к «тоннелям» применены контактные поверхности («интерфейсы»). Моделирование активного оползневого давления  $p_a$  и пассивного отпора грунта  $p_b$  производилось соответствующими распределенными нагрузками по левой и правой границам расчетной схемы.

Вся расчетная область разбивалась на элементы средней крупности. В области влияния сооружения производилось измельчение сетки. Дополнительное сгущение сетки конечных элементов осуществлялось в непосредственной близости от свай при использовании соответствующего «тоннеля» без обделки и контактных поверхностей.

Рассмотрена однорядная удерживающая свайная конструкция при средних грунтовых условиях и разном расположении свай:

диаметр свай $D$ , .....	1000 мм
шаг свай в ряду $L$ , .....	1.25–6.0 $D$
удельное сцепление $c$ , .....	20 кПа
угол внутреннего трения $\varphi$ , .....	10°
модуль деформации $E$ , .....	30 МПа
коэффициент Пуассона $\mu$ , .....	0.38
коэффициент трения по свае $\eta$ , .....	0.6
отпор грунта низового склона $p_b$ , .....	0–250 кПа

Поскольку численные исследования выполнены для оползневых глинистых грунтов, угол дилатансии  $\psi$  принят равным нулю.

Первоначальное нагружение в каждом численном эксперименте производилось до величины отпора грунта  $p_b$  посредством одновременного приложения одинакового давления выше и ниже свайного ряда по склону ( $p_a = p_b$ ). Дальнейшее увеличение активного давления  $p_a$  проводилось при постоянной величине отпора грунта  $p_b$  в режиме автоматического пошагового нагружения вплоть до разрушения грунтового тела в межсвайном пространстве и начала пластического течения грунта. Изучение влияния отпора грунта на напряженно-деформированное состояние грунта окосвайного пространства производилось посредством изменения расстояния между сваями в ряду при разных величинах давления  $p_b$ .

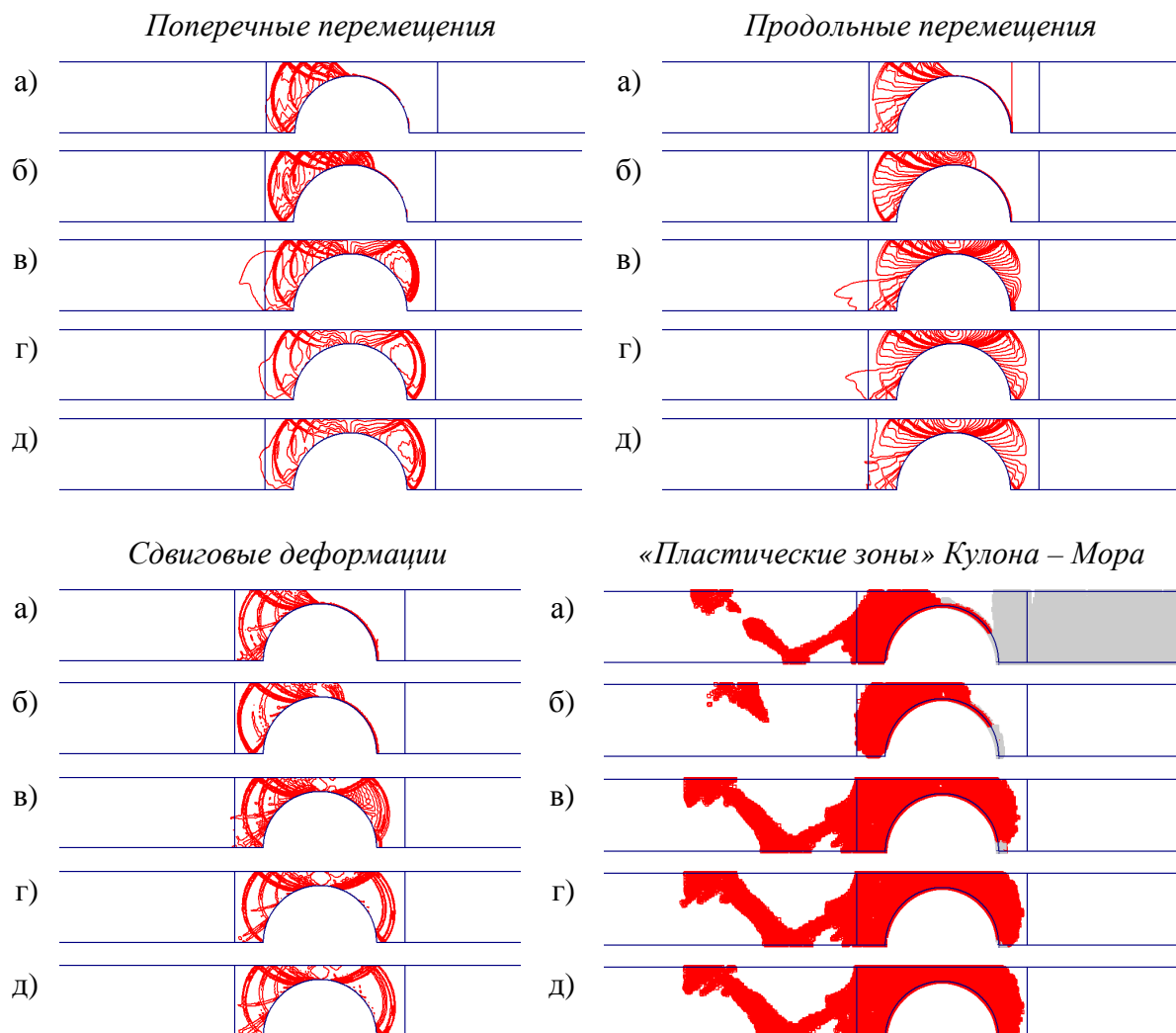
### **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТА**

Исследовались поля относительных деформаций продольных и поперечных перемещений грунта, а также пластических зон по критерию Кулона – Мора. Перемещения грунта приняты продольными и поперечными относительно вектора оползневого давления.

В условиях отсутствия отпора грунта ниже сооружения по склону ( $p_b = 0$  кПа) перед сваями формируются характерные области пластических деформаций, известные из более ранних исследований [3, 6]. В предельном пластическом состоянии они приобретают форму симметричных криволинейных треугольников или «лепестков», опирающихся на клинья уплотненного грунта перед сваями и обращенных в сторону верхового склона. Позади сооружения отмечается отрыв грунта от свай. При относительно небольшом расстоянии между сваями в ряду ( $L < 3.0D$ ) «лепестки» смежных элементов смыкаются. Взаимодействие грунта со сваями характеризуется типом «*однорядного сооружения*» [6, 8] (рисунки 2, а...8, а).

Появление пассивного отпора грунта  $p_b$  существенно меняет характер взаимодействия грунта со сваями. При достаточно тесном расположении свай в ряду ( $L = 1.25D$ ) и незначительном отпоре грунта между смеж-

ными элементами возникают новые смыкающиеся «лепестковые» области (рисунок 2, б).

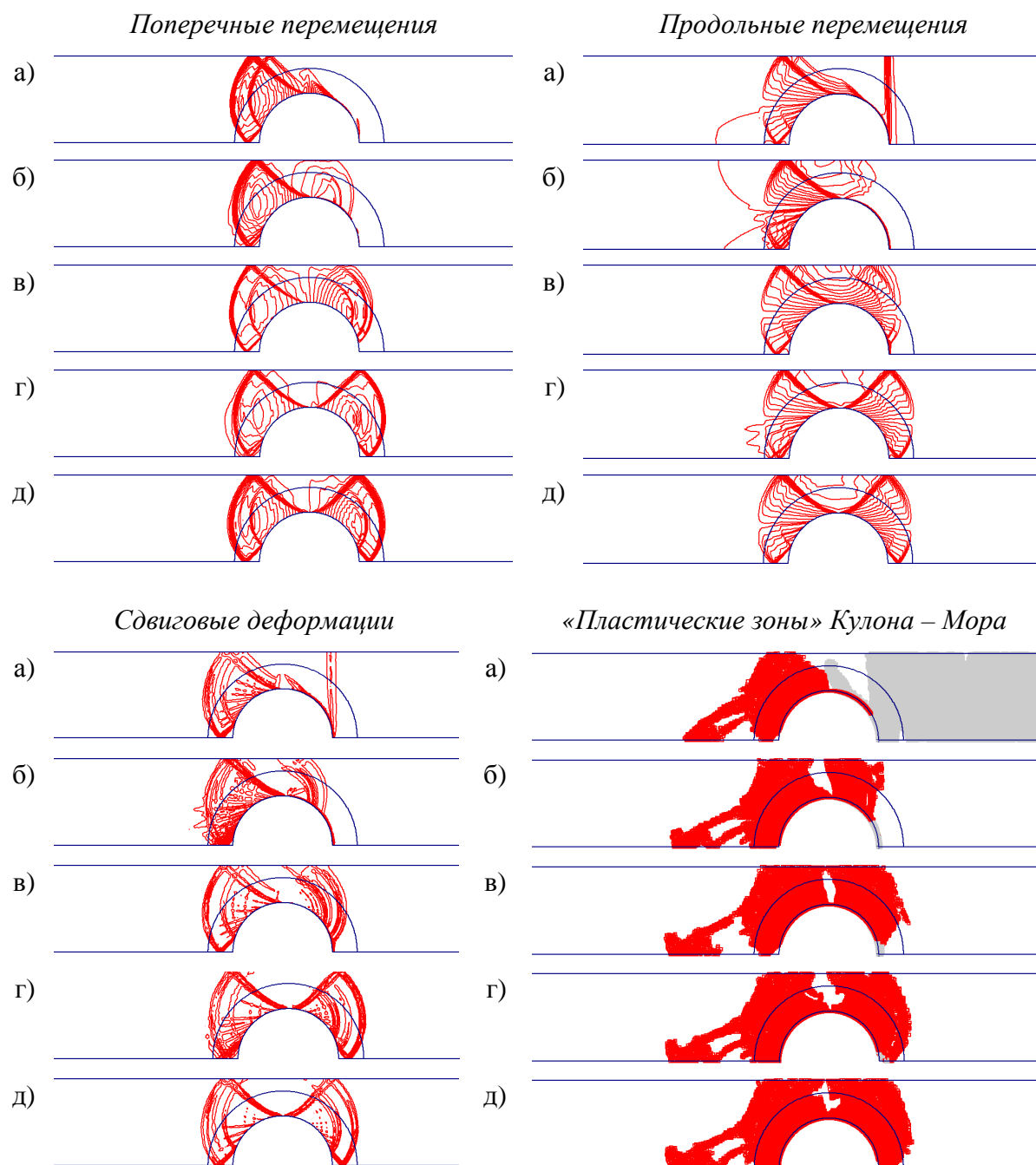


(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 10$  кПа; (в)  $p_b = 70$  кПа; (г)  $p_b = 80$  кПа; (д)  $p_b = 90$  кПа

Рисунок 2 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 1.25 D$

Они имеют незначительные размеры и обращены в сторону низового склона. По мере роста отпора  $p_b$  «обратные лепестки» развиваются в этом же направлении. Внешняя граница пластической области достигает обратной стороны свай (рисунок 2, в). «Обратные лепестки» несколько смещаются от свай с образованием позади них клина грунта в растянутом состоянии (рисунок 2, г). Завершение формирования «обратных лепестков» сопровождается прекращением отрыва грунта позади свай и образованием здесь клина уплотненного грунта (рисунок 2, д). Дальнейшее увеличение

отпора грунта не приводит к заметному изменению характера взаимодействия грунта со сваями (первый ряд «*отдельно стоящих рядов свай*» [6]).

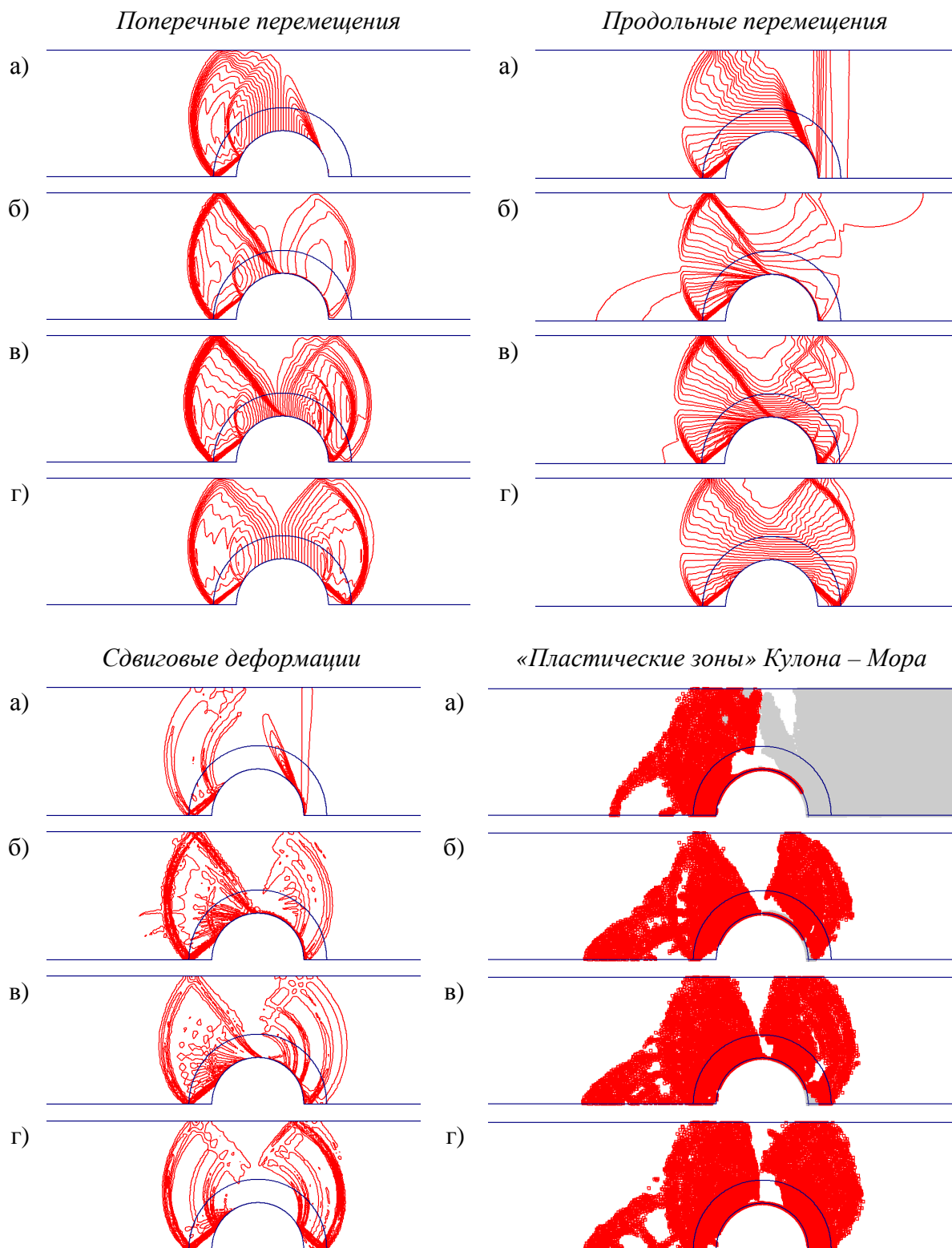


(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 40$  кПа; (в)  $p_b = 70$  кПа; (г)  $p_b = 80$  кПа; (д)  $p_b = 100$  кПа

Рисунок 3 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 1.75 D$

С увеличением шага свай  $L$  до  $(2.75 \div 3.0)D$  растут величины отпора грунта  $p_b$ , соответствующие появлению и окончательному формированию «обратных лепестков». Пластические зоны «фронтальных» и «обратных

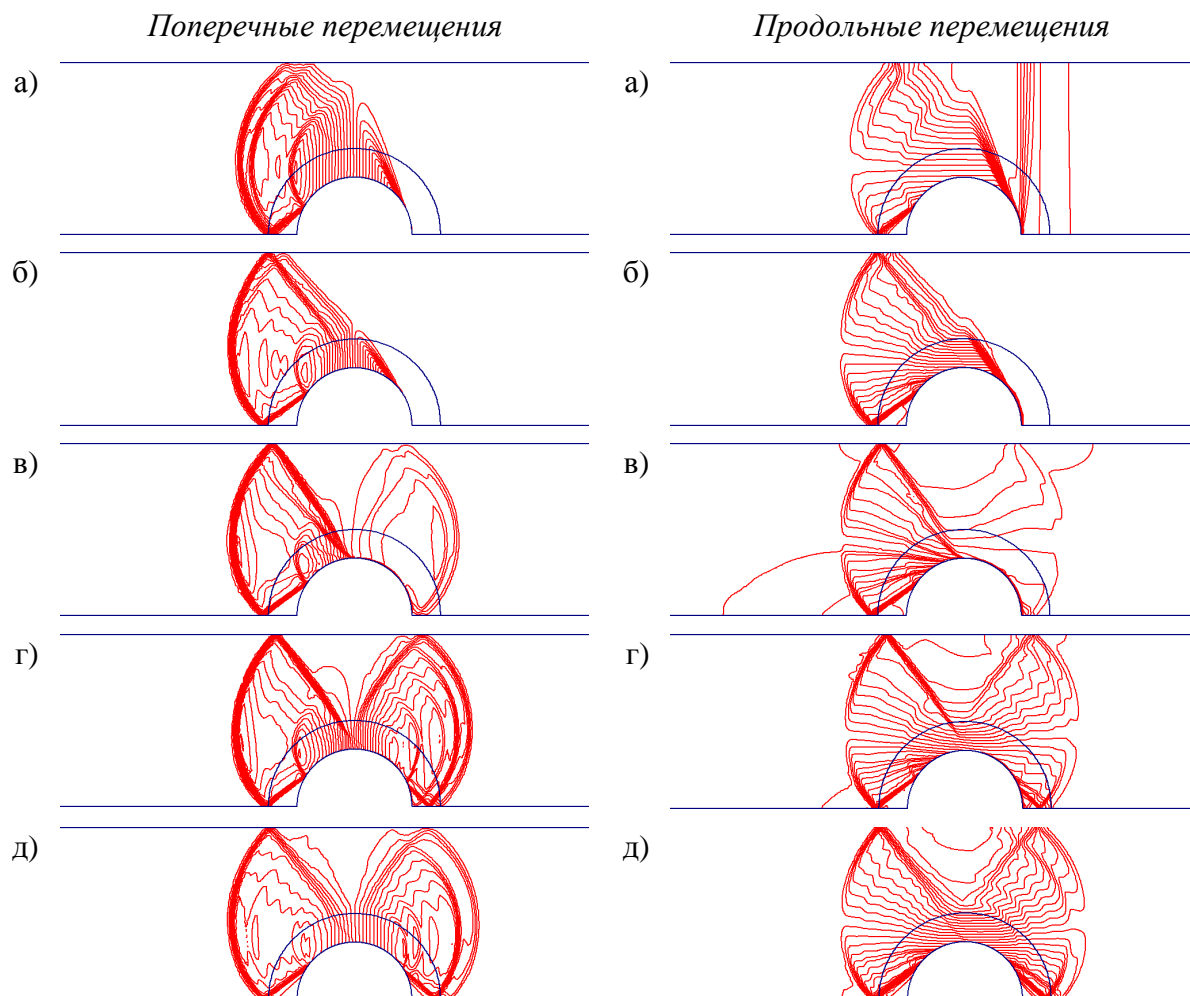
лепестков» обособляются. Однако качественно характер деформирования грунта в зависимости от пассивного отпора  $p_b$  не меняется (рисунки 3–4).



(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 80$  кПа; (в)  $p_b = 90$  кПа; (г)  $p_b = 120$  кПа

Рисунок 4 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 2.75 D$



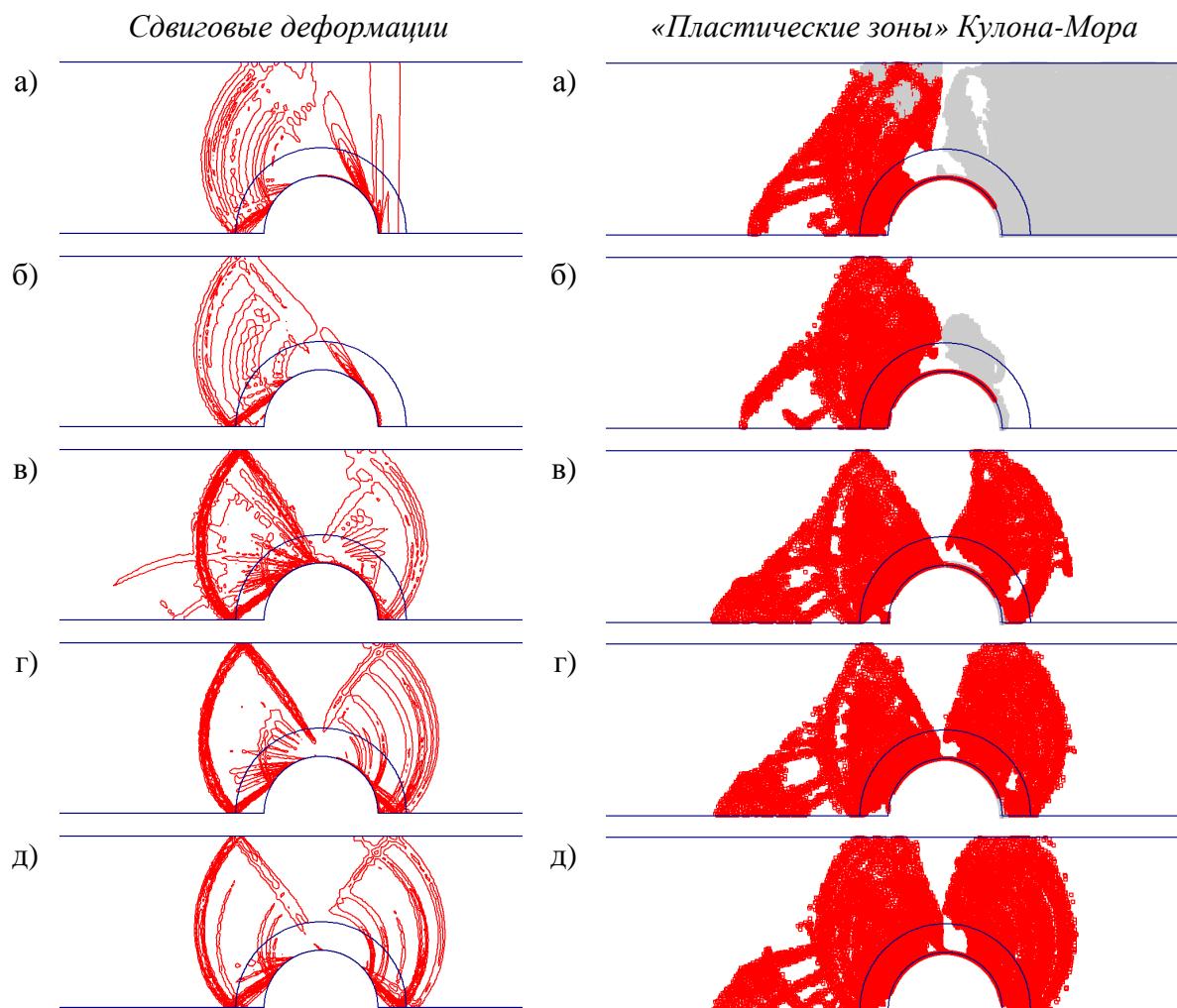


(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 5$  кПа; (в)  $p_b = 90$  кПа; (г)  $p_b = 100$  кПа; (д)  $p_b = 120$  кПа

Рисунок 5 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 3.00 D$  (начало)

По мере увеличения межсвайного интервала приблизительно до  $L = 3.0D$  в условиях отсутствия отпора грунта  $p_b$ , взаимовлияние между смежными элементами заметно ослабевает. «Фронтальные лепестки» практически размыкаются (рисунок 5, а), сваи работают как «отдельно стоящие» упоры [6]. Однако создание даже незначительного давления со стороны низового склона  $p_b$  приводит к смыканию фронтальных «лепестковых» зон у смежных свай, что обеспечивает их совместное сопротивление продавливанию грунта (рисунок 5, б). Просвет между областями пла-

стических деформаций грунта перед сооружением и позади свай заметно увеличивается.

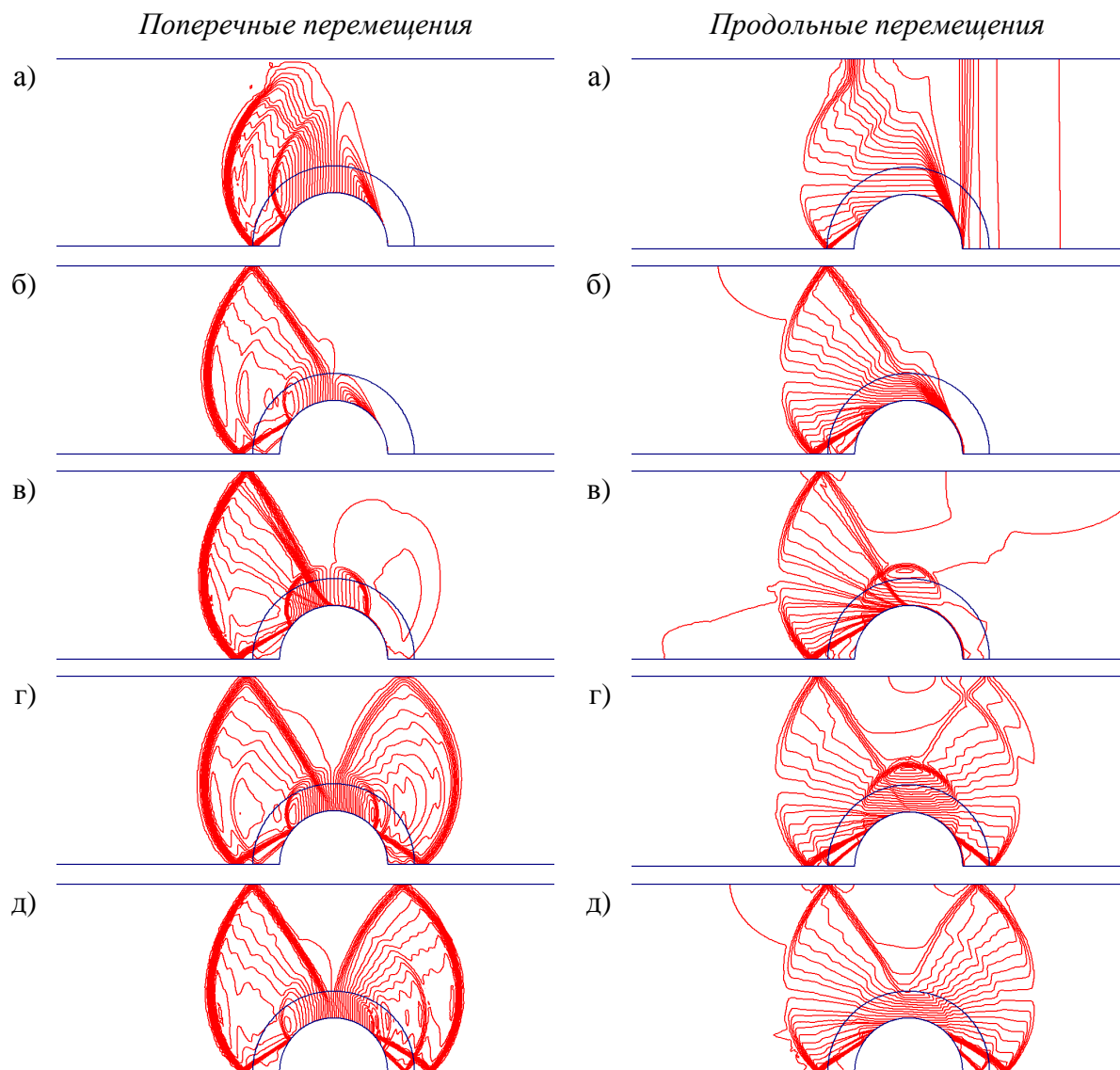


(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 5$  кПа; (в)  $p_b = 90$  кПа; (г)  $p_b = 100$  кПа; (д)  $p_b = 120$  кПа

Рисунок 5 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 3.00 D$  (окончание)

Между сваями образуются новые поверхности сдвига, которые развиваются от точек смыкания смежных «лепестковых» зон к боковой поверхности свай со стороны межсвайного пространства. Образуется характерная область в форме ромба. В пределах «ромбовидной» зоны грунт испытывает только упругие деформации. По мере дальнейшего увеличения отпора грунта  $p_b$  развитие пластических областей приобретает характер, аналогичный более тесному расположению свай (рисунки 5, в...д).

При расстоянии между сваями в ряду  $L$  около  $3.5D$  характер деформирования грунта в зависимости от величины отпора грунта  $p_b$  меняется. Интенсивность перемещений грунта в «ромбовидной» области выравнивается практически по всей ширине межсвайного интервала.

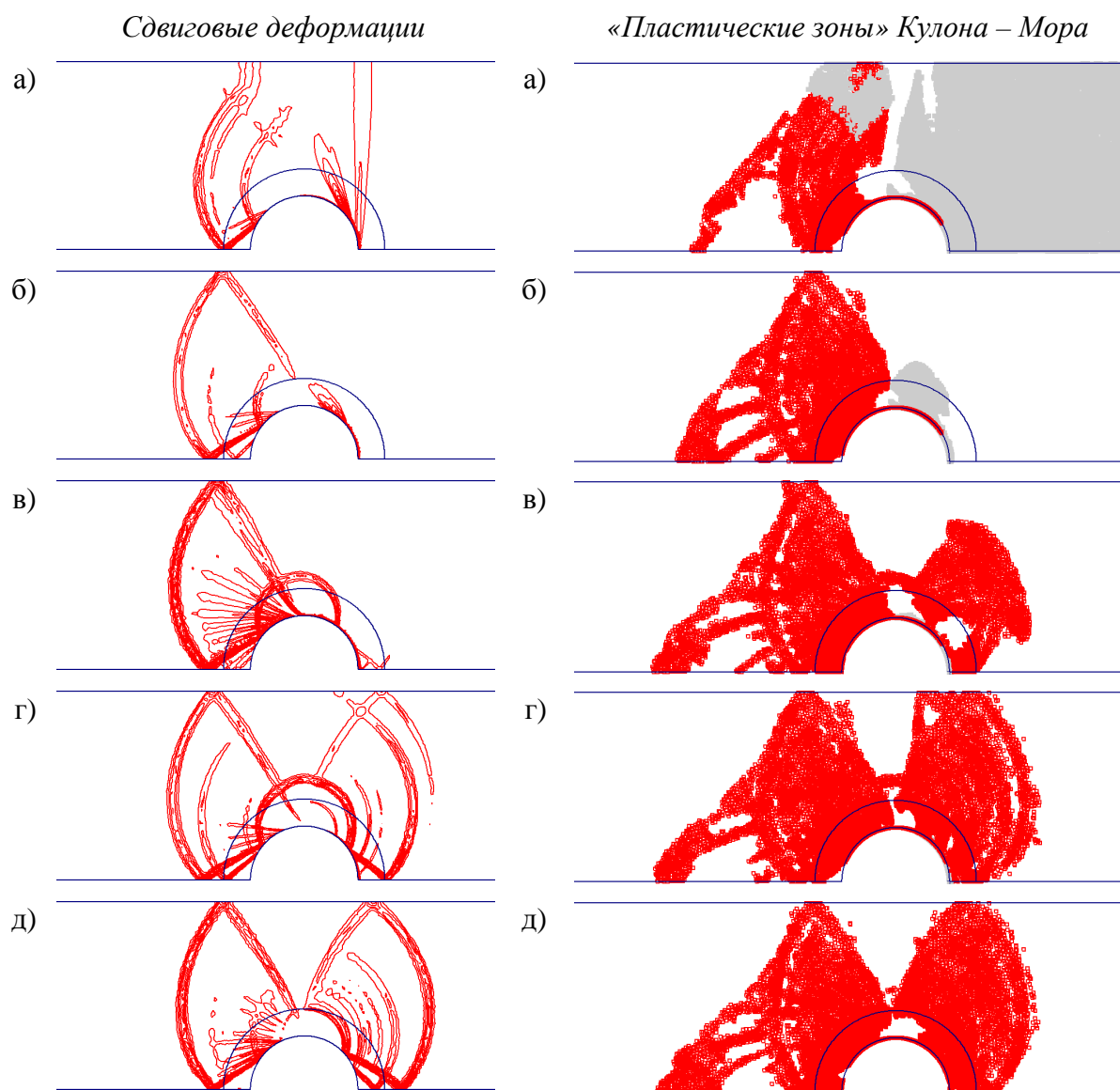


(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 10$  кПа; (в)  $p_b = 100$  кПа; (г)  $p_b = 120$  кПа; (д)  $p_b = 140$  кПа

Рисунок 6 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 3.50 D$  (начало)

В непосредственной близости от боковой поверхности свай образуется «круговая» область пластических деформаций (рисунок 6, в), ограниченная поверхностью сдвига в форме дуги радиусом около  $(0.4 \div 0.5)D$ . Поверхность развивается от основания уплотненного клина перед сваями к их

боковой поверхности с обратной стороны. Ближе к моменту пластического течения она достигает основания уплотненного клина грунта позади свай (рисунки б, г...д). Отмечается постепенная концентрация максимальных продольных перемещений грунта в «круговой» области.



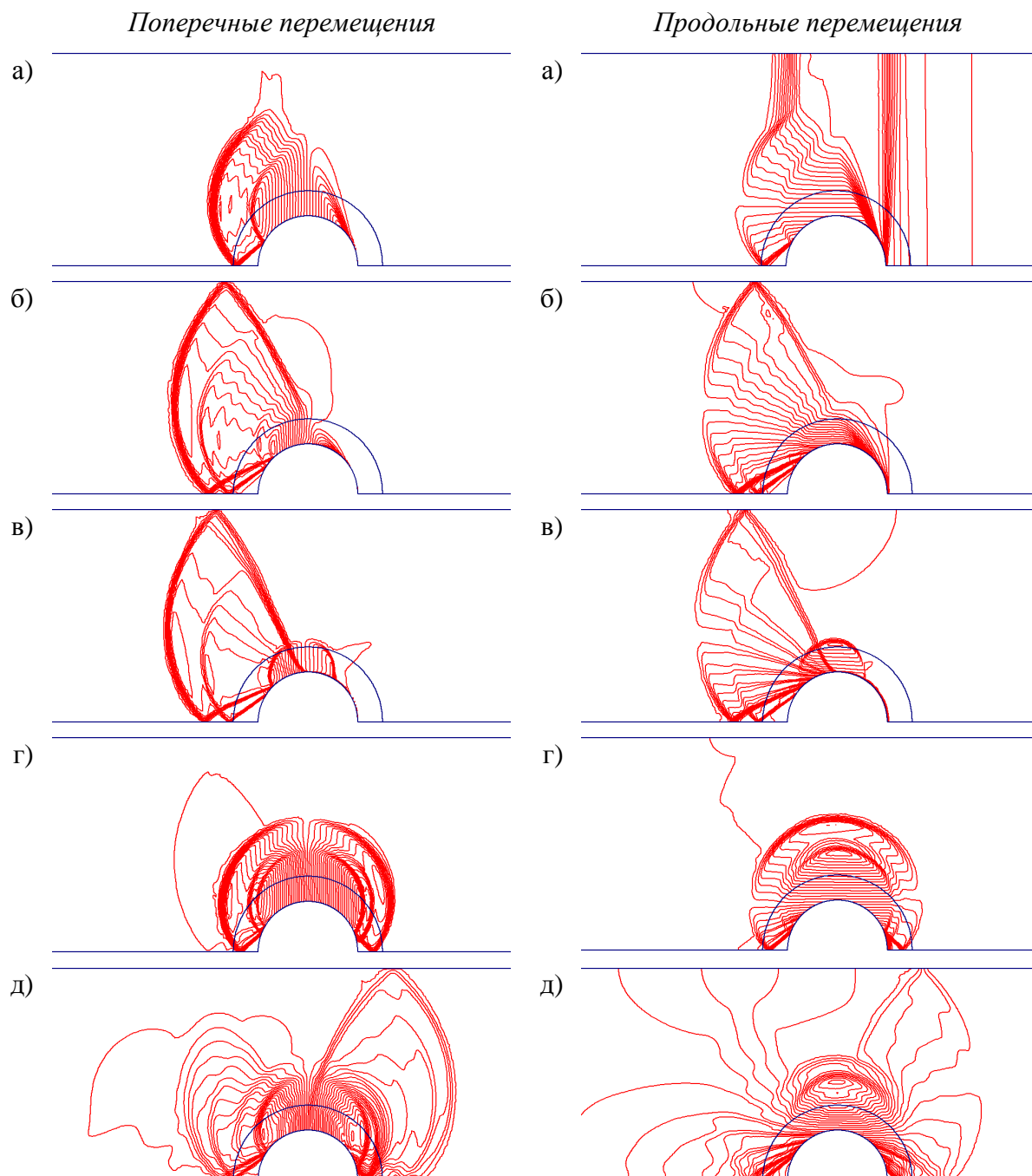
(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 10$  кПа; (в)  $p_b = 100$  кПа; (г)  $p_b = 120$  кПа; (д)  $p_b = 140$  кПа

Рисунок 6 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 3.50 D$  (окончание)

С увеличением шага свай до  $L = 4.25D$  и по мере роста пассивного отпора грунта  $p_b$  формирование «круговой» пластической области сопровождается образованием новой дугообразной поверхности сдвига радиусом около  $0.85D$  (рисунок 7, г). Вторая поверхность развивается вдоль пер-

<http://ej.kubagro.ru/2012/01/pdf/10.pdf>

вой границы: от вершины уплотненного клина перед сваями к вершине клина грунта с обратной стороны. Одновременно с расширением «круговой» пластической зоны практически исчезают «лепестковые» области перед сваями (рисунок 7, в) и появляются «обратные лепестки» (рисунок 7, д).



(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 10$  кПа; (в)  $p_b = 100$  кПа; (г)  $p_b = 160$  кПа; (д)  $p_b = 180$  кПа

Рисунок 7 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 4.25 D$  (начало)

В непосредственной близости от свай отмечается увеличение продольных перемещений грунта (в пределах «круговой» пластической зоны).

При расстоянии между сваями в ряду  $L$  около  $4.75D$  «лепестковые» области пластических деформаций позади свай не образуются (рисунок 8).

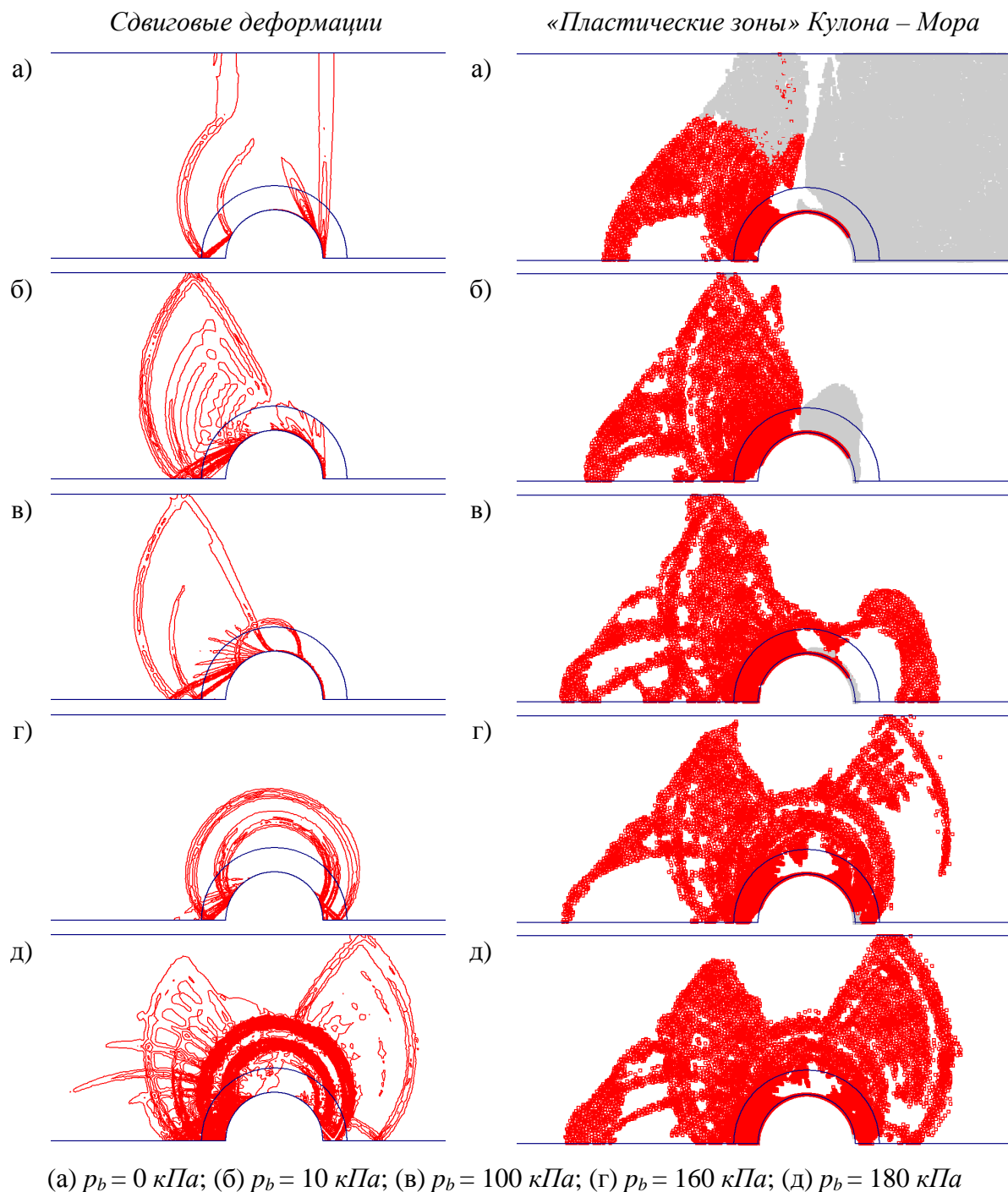
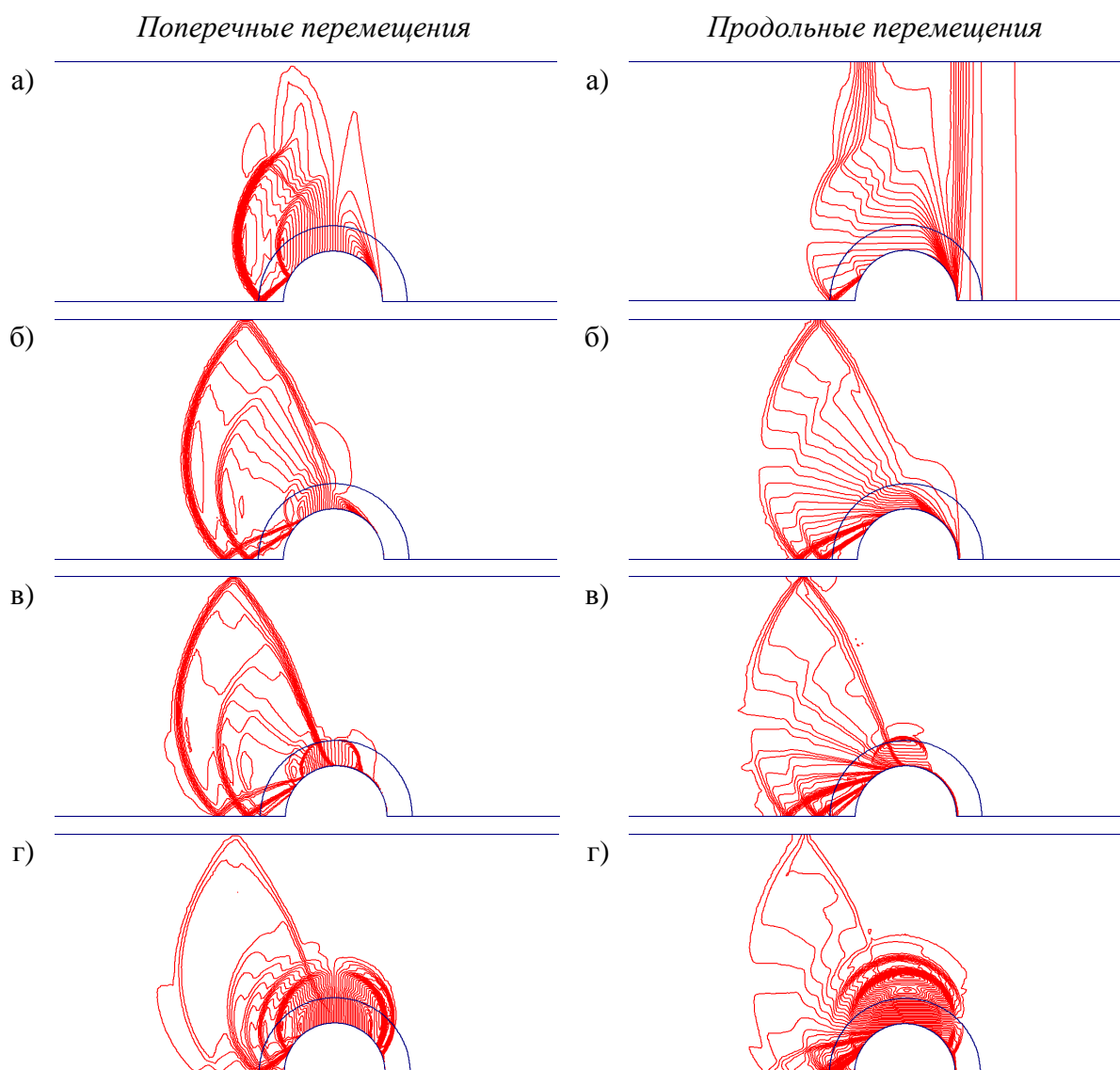
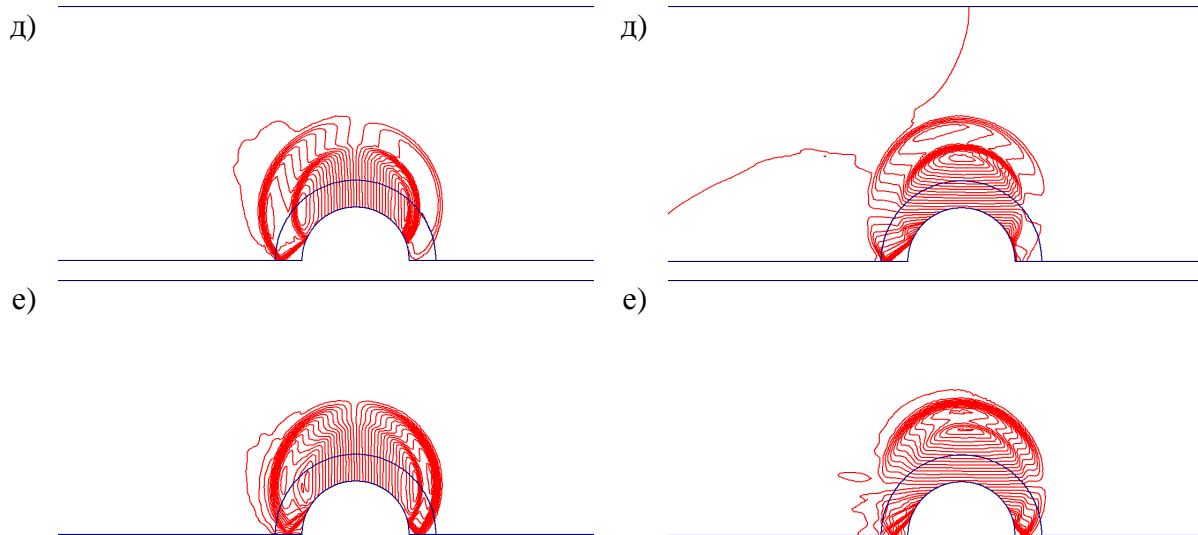


Рисунок 7 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 4.25 D$  (окончание)

При достаточно большом давлении отпора  $p_b$ , максимальные перемещения грунта межсвайного пространства концентрируются в «круговых» пластических зонах. Между смежными «круговыми» зонами грунт перемещается равномерно. Свайные элементы работают в качестве своеобразных режущих элементов. При  $L > 4.75D$  характер деформирования грунта в зависимости от давления пассивного отпора  $p_b$  существенно не меняется.

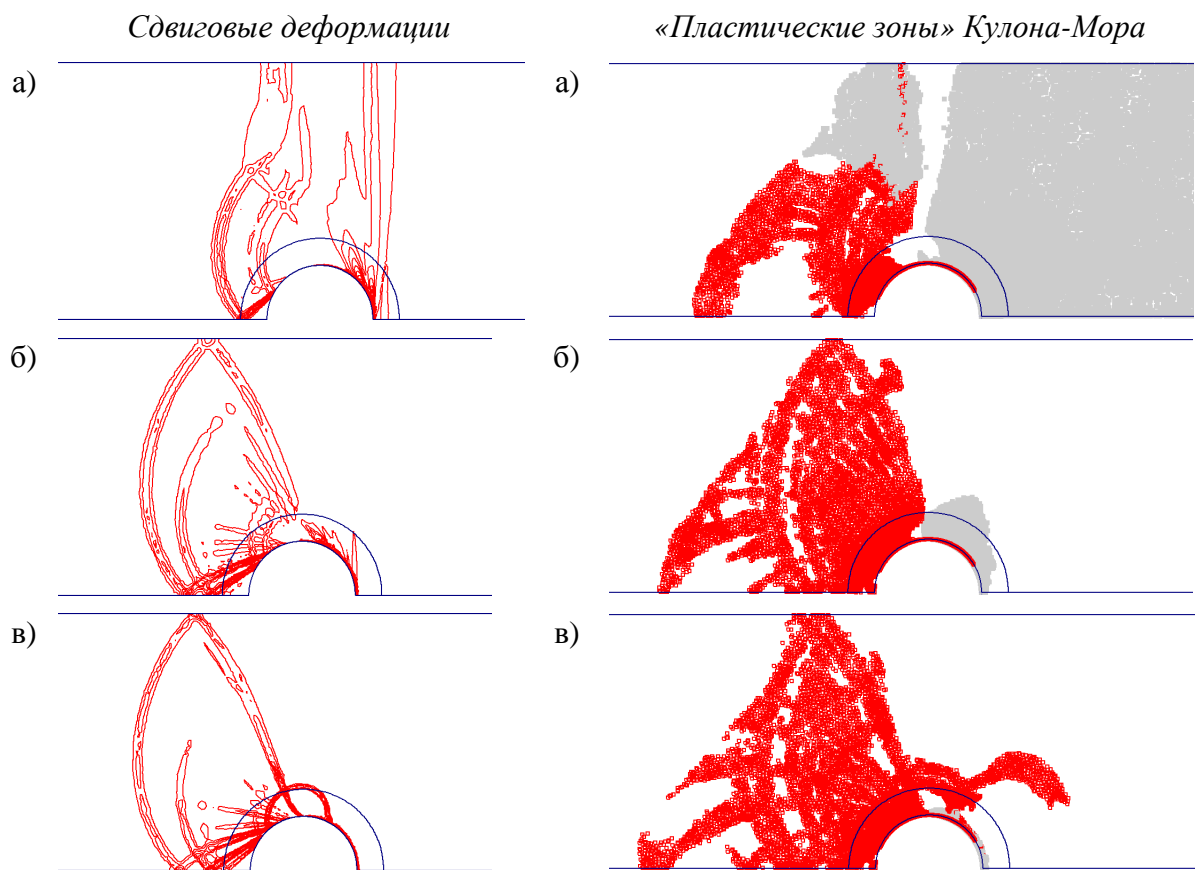




(а)  $p_b = 0$  кПа; (б)  $p_b = 15$  кПа; (в)  $p_b = 100$  кПа; (г)  $p_b = 140$  кПа;

(д)  $p_b = 160$  кПа; (е)  $p_b = 200$  кПа

Рисунок 8 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 4.75 D$  (начало)





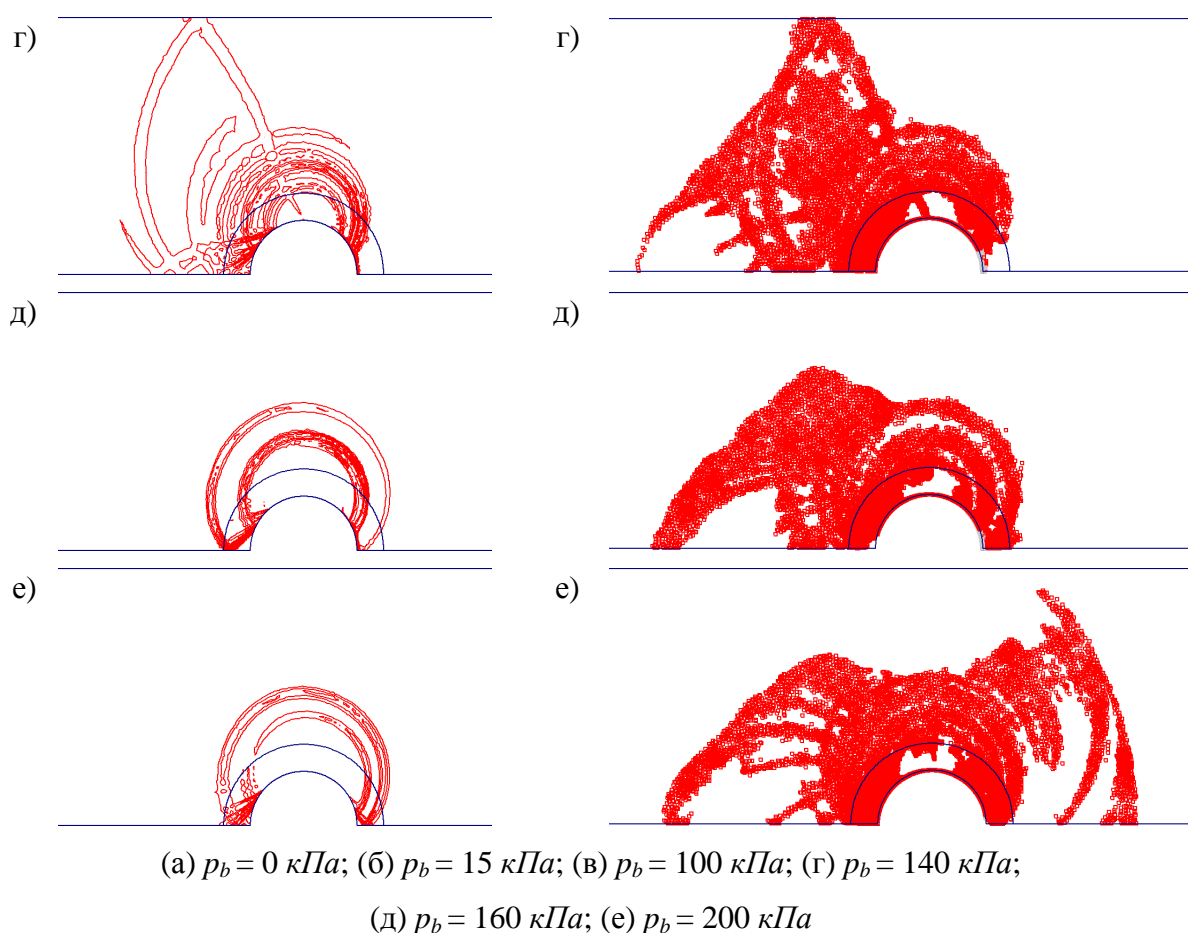


Рисунок 8 – Деформации грунта. Шаг свай  $L = 4.75 D$  (окончание)

### АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

В результате расчетов однорядных свайных конструкций получены графики зависимостей критического оползневого давления (рисунок 9, а) и предельного давления на сваи (рисунок 9, б) при различных величинах пассивного отпора грунта  $p_b$  ниже сооружения по склону.

Анализ полученных данных позволяет установить следующее. Наличие отпора грунта способствует увеличению предельных оползневых давлений и давлений на сваи (далее – предельных давлений). Степень влияния давления отпора зависит от его величины  $p_b$  и расположения свай. Малые значения отпора грунта влияют не так сильно – предельные давления увеличиваются на 12–20 %. При высоких величинах  $p_b$  влияние отпора существенно больше – коэффициент повышения предельных давлений составляет от 4.9 до 5.5 при  $p_b$  до 250 кПа. Влияние расположения свай на пре-

дельные давления более заметно сказывается при малых величинах отпора  $p_b < 100$  кПа и шаге свай  $L < 2.5D$  (взаимовлияние смежных свай), а также при высоких значениях давления отпора  $p_b > 160$  кПа и редком расположении свай  $L > 4.25D$  (работа свай как «режущих» элементов).

При величинах отпора грунта до некоторой пограничной величины (в нашем случае  $p_b \approx 140$  кПа) характер зависимостей аналогичен графикам без учета отпора грунта [6, 7]. С увеличением расстояния в осях между сваями предельные давления уменьшаются. Критическое давление на сваю уменьшается до определенного шага свай, определяющего взаимовлияние смежных контрфорсных элементов.

Увеличение отпора грунта  $p_b$  сверх критического значения приводит к заметному снижению предельных давлений на сваи при расстоянии между ними в ряду  $L > 4.25D$ . Видимо, это связано с концентрацией напряжений и сдвиговых деформаций в непосредственной близости от свай, что способствует образованию здесь «круговых» пластических зон.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования взаимодействия оползневого грунта со сваями однорядного свайного удерживающего сооружения (в рассмотренных грунтовых условиях) установлено следующее:

1. Учет пассивного отпора грунта ниже сооружения по склону позволяет повысить расчетное сопротивление конструкции продавливанию грунта минимум на 15–440 % при шаге свай  $L = 2.5D$ .
2. Степень влияния отпора грунта с глубиной уменьшается, сопротивление продавливанию грунта повышается не менее чем на 20 % при шаге свай до  $L = 6.0D$ .
3. При редком шаге свай ( $L > 4.25D$ ) и на относительно большой глубине ( $p_b > 160$  кПа) грунт деформируется около свай интенсивнее, чем в пролете. Сваи работают как «режущий» элемент.

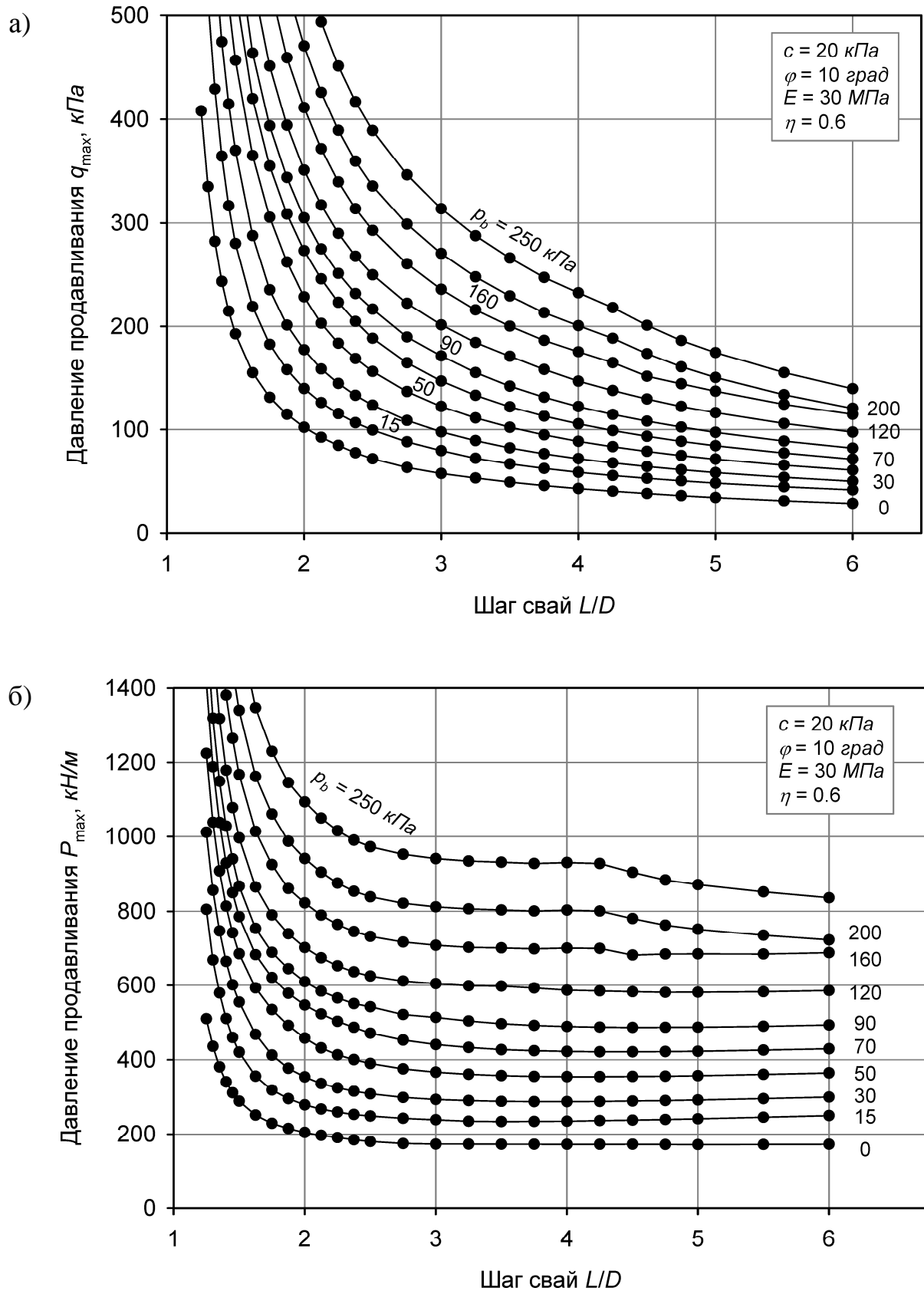


Рисунок 9 – Зависимости (а) критического оползневое давления грунта и (б) давления на сваю от шага свай  $L$  и пассивного отпора грунта  $p_b$

### Список литературы

1. Шадунц К.Ш. К расчету контрфорсных сооружений // Вопросы геотехники: Тр. ДИИТа, 1962. Вып. № 5. С. 24–42.
2. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М: Стройиздат, 1979. 81с.
3. Маций С.И. Взаимодействие свайных рядов с грунтом оползней: Автореферат диссертации. СПб., 1991.
4. Ito T. Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide. / T. Ito, T. Matsui, W.P. Hong // Soils and foundations. 1982. Vol. 22, №1, pp. 1–13.
5. Adashi T. Model tests on the preventive mechanism of landslide stabilizing piles. / T. Adashi, M. Kimura, S. Tada // Doboku gakkou rombunshu: proc. of JSCE, 1988. №400, pp. 243–252
6. Деревенец Ф.Н. Взаимодействие оползневого грунта со сваями с учетом конфигурации удерживающего сооружения: Дисс. ... канд. техн. наук. – Краснодар: КубГАУ, 2006 – 259 с.
7. Маций С.И. Применение метода конечных элементов для исследования взаимодействия грунтов оползня со сваями / С.И. Маций, Ф.Н. Деревенец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: Стройиздат, 2005. – № 4. – С. 8–12.
8. Маций С.И. Взаимодействие оползневого грунта со сваями с учетом конфигурации удерживающего сооружения / С.И. Маций, Ф.Н. Деревенец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: Стройиздат, 2007. – № 2. – С. 8–12.