



УДК 630\*378

*А.Л. Попов*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Попов Александр Леонидович родился в 1987 г., окончил в 2009 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры водного транспорта леса и гидравлики, ассистент кафедры машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет 4 печатные работы в области водного транспорта леса и взаимодействия твердых тел с сыпучими средами.  
E-mail: a.l.popov@narfu.ru

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМ ПРИЗМ ВЫПИРАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ЛЕСОСПЛАВНЫХ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ**

Надежная и безаварийная эксплуатация опор зависит не только от их конструкции, но и от методики расчета держащей силы опоры. Существующие на данный момент методики определения несущей способности основаны на заранее известной форме призмы выпирания, образующейся перед анкерной опорой при ее сдвиге. Поэтому очень важно точное определение форм линий скольжения.

В настоящее время все более широкое применение находят методы, основанные на компьютерном способе обработки изображений. Метод Particle Image Velocimetry (PIV) позволяет обрабатывать изображения, полученные с помощью видео- и фотосъемки.

Метод определения форм линий скольжения грунта при помощи MatPIV апробирован в лаборатории кафедры водного транспорта леса и гидравлики САФУ в грунтовом бассейне с прозрачной боковой стенкой. Была установлена принципиальная возможность регистрации форм линий скольжения данным методом, а также разработана компьютерная программа в MatLab, которая позволяет определять точки сдвига грунта по каждой строке элементарных площадок и строить экспериментальные линии скольжения, проходящие через кромки анкера. С помощью полученных зависимостей были построены теоретические линии скольжения и проведен сравнительный анализ.

Опыты проводили по заранее разработанному плану. Варьируемый фактор – относительная глубина заложения анкера (отношение глубины заложения к диаметру анкера). Уровни варьирования относительной глубины: 2, 4 и 6. В каждой серии на модели проводилось по 6 опытов.

Теоретические линии скольжения рассчитывали по методу квазипотенциального моделирования механических характеристик работы анкера в грунтовом массиве. Установлено, что теоретические линии скольжения удовлетворительно совпадают

с экспериментальными. Коэффициент корреляции равен 0,912, среднее отклонение – 10,07 %. Для механики грунтов это является достаточным соответствием.

Использование метода PIV позволяет унифицировать и автоматизировать процесс регистрации форм линий скольжения.

*Ключевые слова:* водный транспорт леса, анкер, линии скольжения, метод PIV, квази-потенциальная модель.

Опоры анкерного типа широко используются в водном транспорте леса для крепления плотов и гидротехнических сооружений.

Надежная и безаварийная эксплуатация опор зависит не только от их конструкции, но и от методики расчета держащей силы опоры. Методы расчета несущей способности опор можно разбить на три большие группы [1]. К первой относятся методы, в которых очертания кривой скольжения задают на основании тех или иных принятых допущений и практических соображений, ко второй – так называемые строгие методы, в которых очертание кривой скольжения находят в результате теоретических расчетов, к третьей – методы, в которых поверхности скольжения задают приближенным, но достаточно хорошо согласующимся с опытами и строгими теориями способом, что позволяет значительно упростить решение по сравнению с другими методами.

Как видно, существующие на данный момент методики определения несущей способности основаны на заранее известной форме призмы выпирания, образующейся перед анкерной опорой при ее сдвиге. Поэтому очень важно точно определить формы линий скольжения.

Формы линий скольжения при проведении исследований регистрируют различными методами. В.И. Курдюмов предложил метод непосредственного фотографирования движения грунтовых частиц [3]. На фотографиях видно движение грунтовых частиц, но нет четкой границы, по которой происходит скольжение грунтового массива. По методу цветных полосок фотографируют массив грунта и цветные полоски, уложенные у стекла лотка с грунтом. При деформации грунтового массива цветные полоски плавно изгибаются, что видно на фотографиях. В этом случае определение линии сдвига затруднено. Более четко поверхности выпирания или обрушения, по которым произошло скольжение призмы, видны только в момент ее разрушения.

В настоящее время все более широкое применение находят методы, основанные на компьютерном способе обработки изображений. Метод Particle Image Velocimetry (PIV) позволяет обрабатывать изображения, полученные с помощью видео- и фотосъемки. Два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы, разбивают на элементарные (расчетные) области размером  $d_x \times d_y$ . Зная временную задержку между фотографическими снимками и рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц в данной элементарной области, можно рассчитать скорость. Подобная операция для каждой элементарной области, на которые разбито все поле течения, позволяет рассчитать мгновенное поле скоростей [5].

Программный модуль MatPIV, разработанный для программы MatLab Университетом г. Осло [6], позволяет получить поле скоростей при обработке двух изображений. Обработывая полученные результаты в MatLab, можно получить векторное поле скоростей.

Исследование процессов многофазного потока в трубопроводах с помощью MatPIV проводили в Университете г. Ставангер (Норвегия) проф. Р. Тиме [7]. Автором был изучен опыт обработки изображений при помощи MatPIV.

Метод определения форм линий скольжения грунта с использованием MatPIV апробирован под руководством А.Н. Вихарева в лаборатории кафедры водного транспорта леса и гидравлики САФУ в грунтовом бассейне с прозрачной боковой стенкой. В ходе эксперимента была установлена принципиальная возможность регистрации форм линий скольжения данным методом, а также разработана компьютерная программа в MatLab, которая определяет точки сдвига грунта по каждой строке элементарных площадок и строит экспериментальные линии скольжения, проходящие через кромки анкера. Результаты экспериментов и методика их применения отражены в работе [4].

Опыты проводили по заранее разработанному плану. Варьируемым фактором являлась относительная глубина заложения анкера (отношение глубины заложения к диаметру анкера). Уровни варьирования относительной глубины: 2, 4 и 6. В каждой серии на модели проводили по 6 опытов.

Для опытов использовали предварительно просеянный через сито грунт с фракцией 0,25...0,50 мм. Угол естественного откоса грунта составлял 29°. После закладки анкера на требуемую глубину производили послойную засыпку грунтом. Через боковую прозрачную стенку фотографировали перемещение грунта и анкера. Маркерами служили сами частицы грунта. Расположение фотоаппарата в каждом опыте оставалось постоянным. Для снижения искажений при выполнении съемки камеру целесообразно устанавливать на штативе перпендикулярно плоскости съемки, совмещая оптическую ось объектива с центром снимаемого изображения.

При расчете скорости перемещения точек изображение предварительно форматировали до размера 1024 × 800 пикселей (рис. 1). Далее рассчитывали масштаб для пересчета перемещения точки из пикселей в линейный размер.

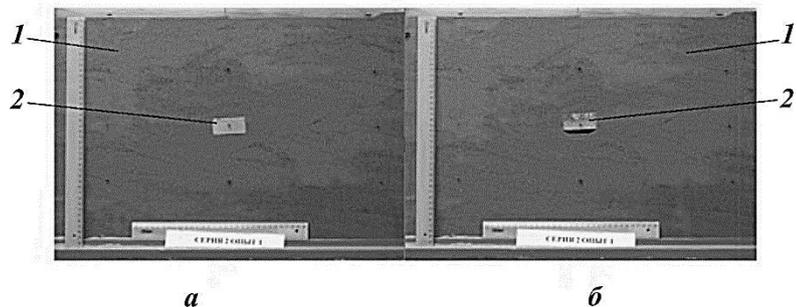
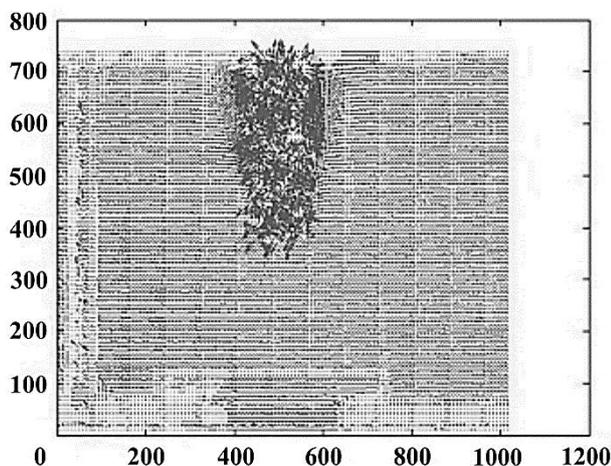


Рис. 1. Схема расположения анкера: *а* – до сдвига, *б* – после сдвига;  
1 – грунт, 2 – анкер

Рис. 2. Векторное поле скоростей



Для этого на снимаемый объект помещали масштабную линейку. В этом случае можно довольно просто пересчитать количество пикселей в линейный размер, а зная линейное перемещение точки и время, рассчитать действительную скорость перемещения точки.

Программный модуль MatPIV выдает поле с мгновенными векторами скоростей (в пикселях) перемещения частиц грунта (рис. 2). Линии скольжения будут проходить там, где отмечено наибольшее перемещение частиц грунта относительно друг друга (наблюдается наибольший скачок скоростей в каждой горизонтальной пиксельной линии).

Теоретические линии скольжения рассчитываются по методу квазипотенциального моделирования механических характеристик работы анкера в грунтовом массиве [2]. Суть метода заключается в следующем. Напряженное состояние анкера моделируется потенциальным потоком типа пространственный «источник», действие грунтового массива – «поступательным потоком», который умножается на переменный множитель, моделирующий гидростатическое распределение давления грунтового массива. Данный поток является квазипотенциальным. Линии (поверхности) скольжения грунтовых призм образуются в состоянии предельного равновесия системы при начальном сдвиге анкера и проходят через его кромки. Напряжения отнесены к весу столба грунта, находящегося над анкером, и являются безразмерными величинами. Координаты, отнесенные к диаметру анкера, также безразмерные.

Безразмерные осевые составляющие поля напряжений источника определены по следующим формулам:

$$\sigma_{1x}^+ = \frac{\sigma_0^+ b_0 x}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}}; \quad \sigma_{1y}^+ = \frac{\sigma_0^+ b_0 y}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}},$$

где  $\sigma_0^+$  – безразмерная интенсивность «источника»;

$b_0$  – масштабная единица анкера;

$x, y$  – соответственно координаты по осям  $x$  и  $y$ .

Напряжения от веса грунта в безразмерном виде

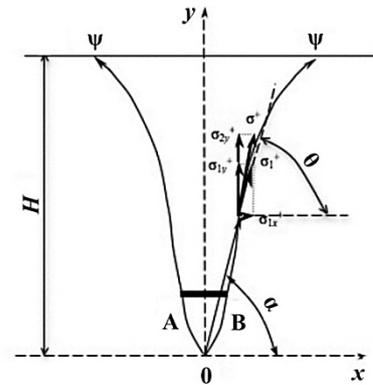
$$\sigma_{2x}^+ = 0; \quad \sigma_{2y}^+ = \frac{H_p - y}{H},$$

где  $H_p$  – глубина погружения мнимого полюса – источника;  
 $H$  – см. рис. 3.

Линии скольжения полученных криволинейных призм определяются положением результирующих линий тока  $\Psi$  суммарного поля. Они проходят через соответствующие кромки анкера. Функции силовых линий нельзя выразить явно посредством алгебраического сложения полей. Поэтому форму  $\Psi$  следует определять с помощью специальной подпрограммы поиска линий скольжения на основе векторной суммы напряжений:

$$\vec{\sigma}^+ = \vec{\sigma}_1^+ + \vec{\sigma}_2^+.$$

Рис. 3. Схема напряжений при построении силовых линий скольжения грунтовой призмы в квазипотенциальном поле



Направление  $\vec{\sigma}^+$  соответствует углу наклона  $\theta$  касательной к  $\Psi$  в каждой точке, тангенс которого определяют по схеме (рис. 3) и приведенной ниже формуле:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\sigma_{1y}^+ + \sigma_{2y}^+}{\sigma_{1x}^+}.$$

Построение линий скольжения в квазипотенциальной среде выполняют с помощью последовательных элементарных приращений  $\Delta x$  или  $\Delta y$ , начиная от точек A и B, по следующим формулам:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x \operatorname{tg}\theta \quad \text{или} \quad y_{i+1} = y_i + \frac{\Delta y}{\operatorname{tg}\theta}.$$

Построение заканчивают при условии  $y_i = H$ . Форма расчетной криволинейной призмы зависит от различных входных параметров: относительной глубины заложения центра анкера  $H^+ = H/d$  (где  $d$  – диаметр анкера), а также от угла внутреннего трения  $\varphi$ . Теоретические призмы скольжения, например для  $\varphi = 29^\circ$ , при различных глубинах заложения анкера показаны на рис. 4. Они выполнены в относительных координатах  $x^+ = x/d$ ,  $y^+ = y/d$ , приведенных к центру рабочей плоскости анкера.

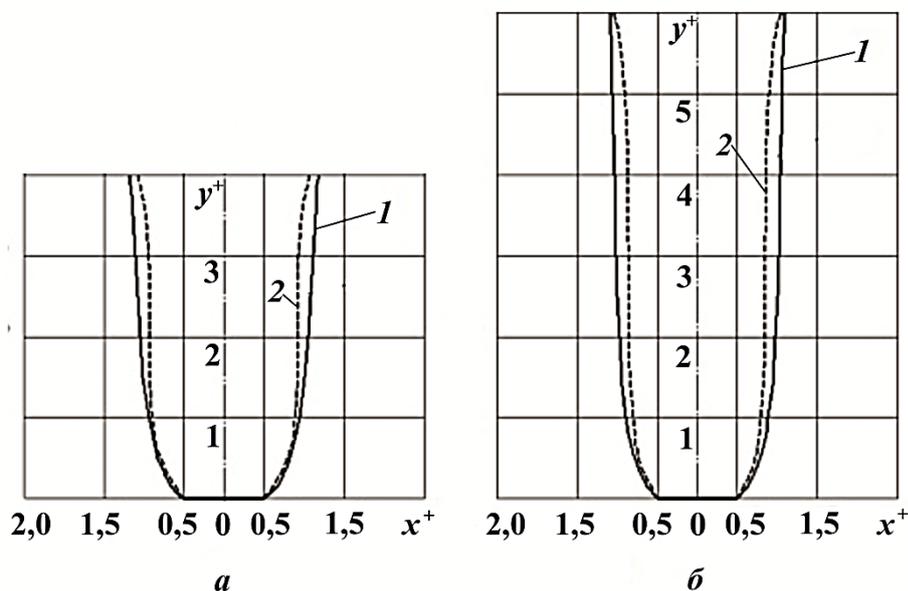


Рис. 4. Теоретические (1) и экспериментальные (2) формы призм скольжения при  $\varphi = 29^\circ$ : а –  $H^+ = 4$ ; б –  $H^+ = 6$

Пунктиром показаны линии скольжения, полученные экспериментально. Теоретические линии скольжения удовлетворительно совпадают с экспериментальными. Коэффициент корреляции равен 0,912, среднее отклонение – 10,07 %, что для механики грунтов является достаточным соответствием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн М.Н., Кушнер С.Г., Шевченко Р.И. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений. К.: Будивельник, 1977. 208 с.
2. Вихарев А.Н. Расчет формы призмы выпирания грунта при вертикальном сдвиге анкера круглой формы методом квазипотенциального моделирования // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр. ф-та природных ресурсов АГТУ. Вып. 4. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2010. С. 80–86.
3. Первое фотографическое исследование процесса разрушения грунта под фундаментом // Геореконструкция фундаментпроект. Режим доступа на официальный сайт компании: <http://www.georec.spb.ru/journals/07/files/pdf/0407013.pdf>
4. Регистрация форм грунтовых призм, образующихся перед анкером при его сдвиге с помощью MATRIV / А.Н. Вихарев, А.Л. Попов, А.А. Емельянов, В.Л. Рымашевский // Наука – Северному региону: сб. материалов науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных, инженерно-технических работников и аспирантов по итогам работ за 2010 год. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2011. С. 22–22.
5. Руководство пользования программой ActualFlow. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2007. 165 с.

6. Сайт университета г. Осло. Режим доступа: <http://folk.uio.no/jks/matpiv>.

7. *Rune W. Time. Two-Phase Flow in Pipelines – Course Compendium with Matlab Examples and Problems.* Department of Petroleum Engineering, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, January 2007. 172 p.

Поступила 10.12.12

**A.L. Popov**

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

### **Results of Research on Bulging Prisms of Vertically Loaded Floating Ground Anchors**

Reliable and trouble-free operation of bearings depends not only on their design, but also on the method of calculating their holding power. The existing techniques for determining carrying capacity are based on a predetermined form of ground prism that is formed before the anchor bearing at its displacement. It is therefore very important to determine the exact shape of slip lines.

At present, methods based on electronic image processing are finding ever-widening application. Particle Image Velocimetry (PIV) allows us to process images produced by video filming and photography.

The method of determining the form of soil slip lines using MatPIV was tested under the guidance of A.N. Vykharev in the laboratory of the Department of Waterborne Timber Traffic and Hydraulics (NArFU) in the groundwater basin with a transparent side panel. As a result, we established a possibility in principle to record forms of slip lines using this method and developed a computer program in MatLab, which determines the points of soil displacement for each row of elementary areas and constructs experimental slip lines passing through the edges of the anchor.

Using the obtained relationships we constructed theoretical slip lines and carried out a comparative analysis.

The experiments were performed according to a predetermined plan. The relative depth of the anchor (the ratio of depth of the anchor to diameter) was the varying factor. Varying levels of relative depth: 2, 4 and 6. In each series we conducted 6 model-based experiments.

Calculation of theoretical slip lines was done using the method of quasipotential modelling of the mechanical characteristics of the anchor operating in the soil mass.

The theoretical slip lines satisfactorily coincide with the experimental ones. The correlation coefficient is 0.912, the mean deviation being 10.07 %, which is a sufficient correspondence for soil mechanics.

The use of PIV allows us to standardize and automate the process of recording the forms of slip lines.

*Keywords:* waterborne timber traffic, anchor, slip lines, PIV method, quasipotential model.