

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 177 с.
2. Емельянов В.К., Мамаев Ю.А., Кудлай Е.Д. Подземная разработка многолетнемерзлых россыпей. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
3. Кудлай Е.Д., Докукин А.К., Поздняков Э.С. Применение комплексов самоходных машин на подземной разработке россыпей // Колыма. – 1987. – № 3. – С. 14–16.
4. Антонов Л.Н., Хорес В.А. Технология буровзрывных работ при проходке разведочных выработок с использованием переносных и самоходных буровых установок // Техника и технология геологоразведочных работ. Организация производства. Обзор. – М.: ВИЭМС, 1985. – 59 с.
5. Викулов М.А., Егоров И.К., Скрипник И.А., Дубинин В.П. Применение самоходного оборудования на геологоразведочных работах и охрана природы // Минеральное сырье и природа: Тез. докл. Всес. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 1988. – С. 21–22.
6. Панкратов А.В. Перспективы использования самоходного оборудования на подземных горно-разведочных работах в условиях Северо-Востока страны // Проблемы и перспективы развития горного дела на Северо-Востоке СССР: Матер. научно-практ. семина. Ч. 2. – Якутск: ИГД Севера СО АН СССР, 1990. – С. 203–211.
7. Панкратов А.В. Повышение загрузки проходческого оборудования за счет совершенствования ведения горных работ на разведочных горизонтах (на примере золоторудных месторождений Северо-Востока): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: 1999. – 24 с.
8. Лукьянов В.Г., Панкратов А.В. Повышение фондоотдачи самоходного оборудования при многозабойном проходе разветвленных систем горизонтальных горных выработок // Вестник Российской Академии естественных наук. – 2002. – Вып. 5. – С. 223–230.
9. Лукьянов В.Г. и др. Руководство по технологии и организации скоростного проведения горизонтальных горно-разведочных выработок. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1984. – 189 с.

Поступило 28.04.2011 г.

УДК 621.644

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГРУНТА, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПРОКЛАДКИ БЕСТРАНШЕЙНОГО ТРУБОПРОВОДА

С.В. Поварницын, А.В. Рудаченко

Томский политехнический университет  
E-mail: povarnit@tpu.ru

*Обобщены вопросы определения перемещений грунта, возникающих в процессе прокладки бестраншейного трубопровода. Описана конструкция стенда, разработанная и сконструированная авторами для исследования силовых характеристик, определения перемещений грунта, способа прокола трубопровода в грунте. Приведены рекомендации по подготовке и последующей обработке изображения методом измерения скоростей полей деформаций.*

### Ключевые слова:

*Метод измерения скоростей полей деформаций, горизонтально-направленное бурение, микротоннелирование, методы восстановления трубопроводов, щитовая проходка.*

### Key words:

*Particle image velocimetry, horizontal directional drilling, microtunneling, pipe bursting, pipe jacking.*

В настоящее время бестраншейные способы строительства, такие как горизонтально-направленное бурение, микротоннелирование, продавливание и прокол, получили широкое распространение во многих областях строительства, а также промышленного производства. Примерами такого использования являются: в гражданском строительстве – строительство трубопроводов и подземных коммуникаций, в нефтегазовой промышленности – строительство магистральных трубопроводов, в горном деле – сооружение горизонтальных скважин различного назначения.

Экспериментальные исследования в области восстановления трубопроводов бестраншейным способом (*pipe bursting*) проведены В. Laros [1]. В работе обобщены силовые характеристики и деформационные процессы в грунте при восстановлении трубопровода бестраншейным способом,

сущность которого заключается в разрушении старого трубопровода специальным наконечником с одновременным затягиванием нового трубопровода. Описание деформационных процессов в грунте при прокладке бестраншейного трубопровода способом щитовой проходки (*pipe jacking*) выполнено D.N. Chapman [2] и M. Marshall [3].

Актуальность исследования заключается в повышении эффективности использования способа прокола при сооружении бестраншейного трубопровода.

Целью исследования является разработка лабораторного стенда для определения перемещений в грунте при сооружении бестраншейного трубопровода способом прокола.

Для определения перемещений в грунте использовался метод *particle image velocimetry (PIV)* [1]. Это метод измерения скоростей, который был изо-

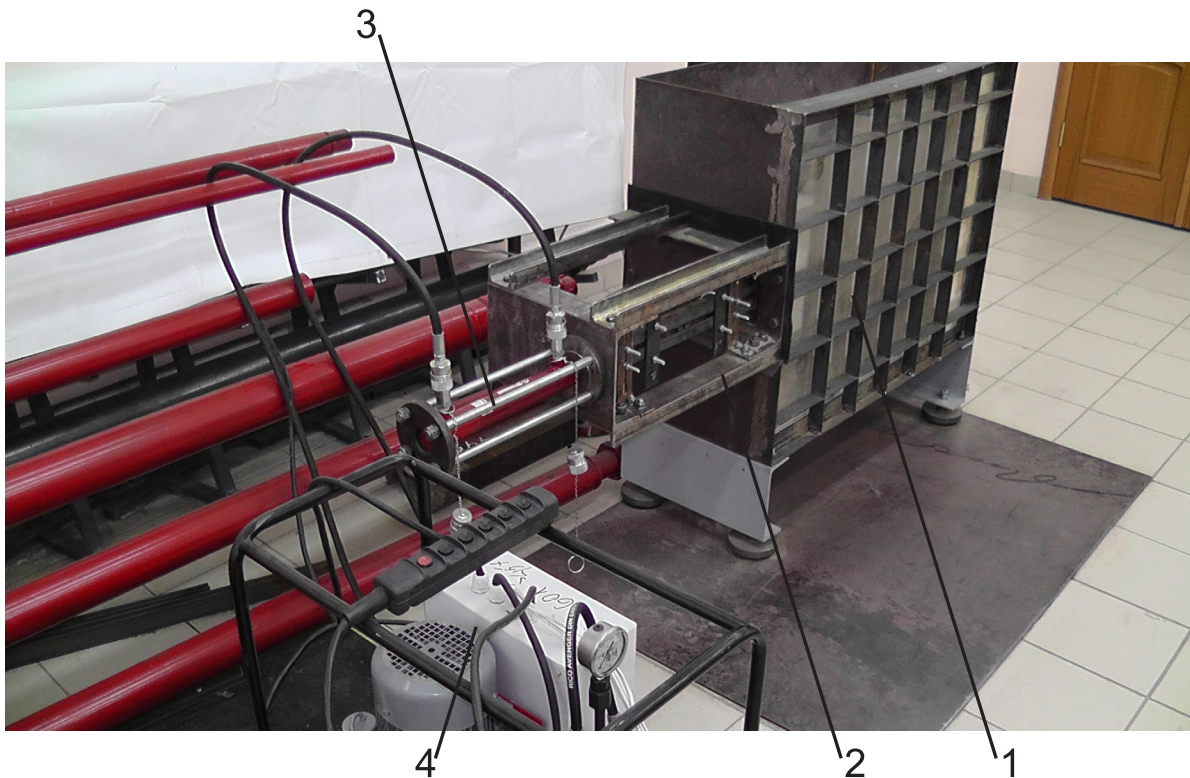


Рис. 1. Лабораторный стенд: 1) корпус с грунтом; 2) направляющая трубопровода; 3) домкрат; 4) насосная станция

бретен для экспериментальных исследований в области механики жидкости в 1991 г.; позже метод был адаптирован для использования в геотехнических исследованиях. В отличие от обработки изображения жидкости, где необходимо введение дополнительных маркеров (частиц), грунт имеет свою собственную текстуру в форме гранул различных оттенков, что облегчает обработку изображений. Но при необходимости, возможно, использовать маркеры (окрашенный песок).

Метод *PIV* осуществляется следующим способом: подготавливаются изображения процесса перемещения грунта, данные изображения обрабатываются попарно, после чего суммируется общее перемещение. Обрабатываемые изображения делят на области, содержащие определенное количество пикселей, затем каждая область первого изображения сравнивается с областью второго, а степень соответствия определяется величиной кросс-корреляции. Для определения перемещения рассматриваемой области выполняют поиск максимума функции корреляции [4, 5].

Для определения перемещений грунта при бесстранишной прокладке трубопровода был сконструирован и изготовлен лабораторный стенд, рис. 1. Стенд включает в себя корпус, гидравлическое и контрольно-измерительное оборудование. Корпус состоит из ёмкости с грунтом – 1, направляющей рамы – 2 для размещения гидродомкрата – 3 и трубопровода, передняя стенка корпуса выполнена из полиметилметакрилата. Гидравличе-

ское оборудование состоит из насосной станции – 4, рукавов высокого давления, запорно-распределительного оборудования, гидродомкрата. В состав контрольно-измерительного оборудования входит видеочамера с приспособлениями (штатив, система освещения), микропроцессорный измеритель-регулятор, тензодатчик, конвертор, компьютер.

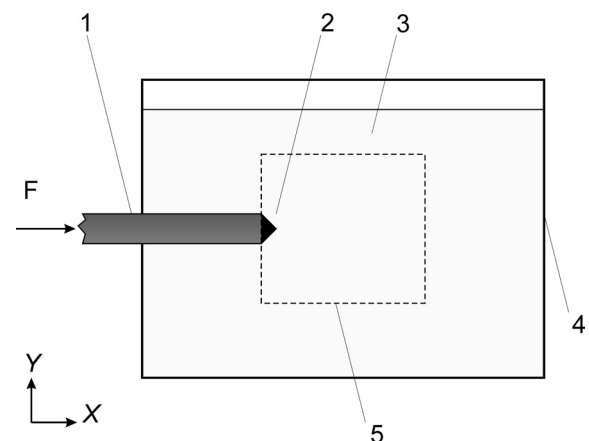
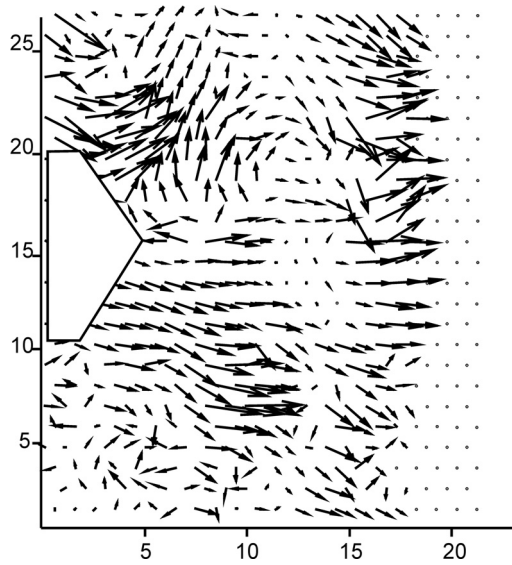
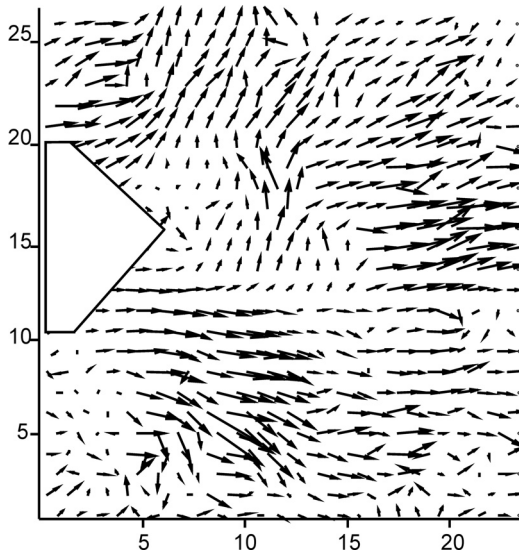


Рис. 2. Схема проведения эксперимента: 1) сегмент трубопровода; 2) конусный наконечник; 3) грунт; 4) плоскость симметрии; 5) область видеосъемки

Общая схема процесса внедрения трубопровода с конусным наконечником представлена на рис. 2. Параметры массива грунта в плоскости симметрии: длина 1000 мм, высота 800 мм. Область видеосъемки составила 440×300 мм.



a



b

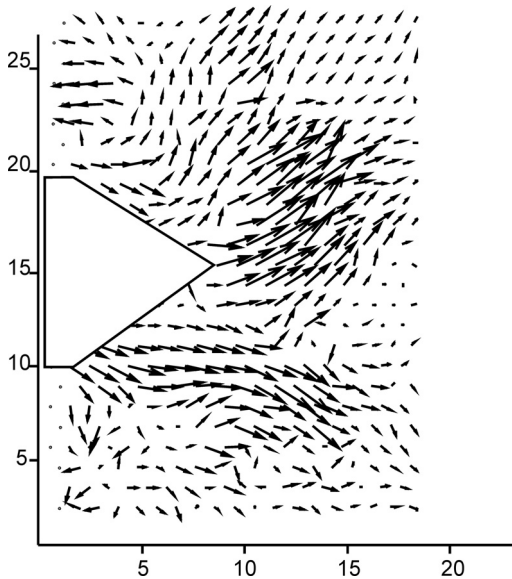


Рис. 3. Зависимость деформационных процессов в грунте от угла конуса наконечника, см: а) 30; б) 45; в) 60°

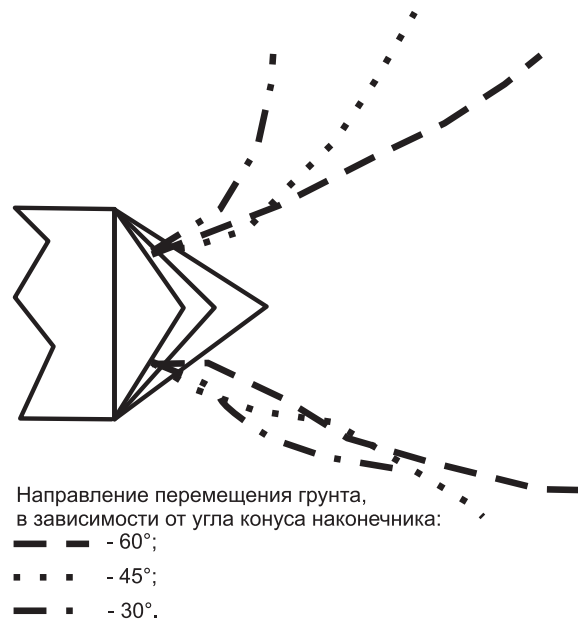
Грунт представляет собой сухой сеяный песок с размером зерен 0,6...1,25 мм, насыпной плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>. Трубопровод выполнен в виде сегмента диаметром 100 мм. Конусные наконечники выполнены с углом конуса 30, 45, 60°.

В ходе эксперимента выполнено три операции по вдавливанию трубопровода с наконечником в грунт. Перед каждой операцией восстанавливалось начальное напряженно-деформированное состояние грунта. Процесс передвижения трубопровода в грунте записывался на цифровую видеокамеру с разрешением видеосъемки 1920×1080 и скоростью 25 кадр/с. Оптимальное фокусное расстояние до плоскости симметрии составило 450 мм.

Полученная видеозапись обрабатывалась с использованием специального программного обеспечения (*HD Writer AE 2.0*). Из видеофайла извлекались необходимые стоп-кадры с заранее известным между ними интервалом времени.

Обработка изображений методом *PIV* может быть выполнена с использованием различных программных продуктов с открытыми кодами, например: *MatPIV*, *PIVlab*, *OpenPIV*, *JPIV*, *Gpiv*. Наиболее подходящей программой для решения рассматриваемой задачи является *MatPIV*, т. к. данная программа имеет большое количество фильтров обработки изображения. В процессе обработки изображения были использованы следующие фильтры: *signal to noise ratio filter*, *peak height filter*, *global filter*, *local filter*. Данные фильтры удаляют ложные векторы, образующиеся на изображениях с низким качеством, а области удаленных векторов замещаются интерполяцией соседних.

Результатом эксперимента после обработки изображений являются векторы перемещения грунта, по которым можно судить о характере деформационного процесса. На рис. 3 приведены векторы перемещения грунта для трубопровода диаметром 100 мм с тремя различными наконечниками.



в

Направление перемещения грунта, в зависимости от угла конуса наконечника:  
 - - - - 60°;  
 - . . . - 45°;  
 - - - - 30°.

Рис. 4. Осредненное направление перемещения грунта

После соответствующей обработки изображений определено осредненное направление перемещения грунта, рис. 4.

По результатам обработки изображения, рис. 3, можно судить о том, что конструкция стенда и программное обеспечение позволяют выполнять исследования на качественном уровне. Основная сложность заключается в правильной оценке толщины и прозрачности полиметилметакрилата, фокусного расстояния видеосъемки, освещенности, выборе программного обеспечения с наличием фильтров обработки изображения.

В перспективе авторы планируют изучить деформационные процессы в грунте при обратном и последовательном расширении скважины, раз-

личие деформационных процессов в глинистом и песчаном грунте, влияние неоднородности свойств грунта по разрезу на деформационные процессы.

#### Выводы

Разработан лабораторный стенд, позволяющий выполнять экспериментальные исследования по определению перемещений грунта при бестраншейной прокладке трубопровода. Для определения деформационных процессов грунта сеяного песка с размером зерен 0,6...1,25 мм использована программа *MatPIV* с последовательным использованием фильтров обработки изображения. Получены поля перемещений грунта для конусных наконечников с варьируемым углом конуса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lapos B., Brachman R.W.I., Moore I.D. Laboratory measurements of pulling force and ground movement during a pipe bursting test. 2011. URL: [http://nastt.org/store/technical\\_papersPDF/302.pdf](http://nastt.org/store/technical_papersPDF/302.pdf) (дата обращения: 03.06.2011).
2. Chapman D.N., Rogers C.D.F. Ground movement associated with trenchless pipelaying operations. 2011. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/7509> (дата обращения: 03.06.2011).
3. Marshall M. Pipe-Jacked Tunnelling: Jacking Loads and Ground Movements. 2011. URL: <http://www-civil.eng.ox.ac.uk/publications/theses/marshall.pdf> (дата обращения: 03.06.2011).
4. White D.J., Take W.A., Bolton M.D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry and photogrammetry. 2011. URL: [http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech\\_new/people/bolton/mdb\\_pub/133\\_Geotechnique\\_No\\_53\\_Issue7\\_619\\_632.pdf](http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/people/bolton/mdb_pub/133_Geotechnique_No_53_Issue7_619_632.pdf) (дата обращения: 03.06.2011).
5. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформация песка в основании полосового шлама // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 1. – С. 26–28.

*Поступила 20.05.2011 г.*