

Мировые правила и стандарты испытаний свай с применением «метода волновой теории удара».

Дж. Бейм (G. Beim), Г. Ликинс (G. Likins)

Pile Dynamics, Inc.

Ключевые слова: динамическое испытание фундаментов, правила, стандарты, спецификации, запас прочности, проектирование фундаментов

Краткое изложение. Десять лет назад была выпущена работа Beim, J. et al. (1998) (*здесь и далее приводятся ссылки на работы из раздела «список литературы» - прим. пер.*), в которой были собраны мировые правила и стандарты, относящиеся к высоко- и низкодеформационному динамическому испытанию. Данная работа предсказала развитие и внедрение многих новых нормативных документов в последующие годы. Настоящая статья имеет целью верифицировать степень исполнения тех предсказаний. В ней обновлён список правил и стандартов от 1998 года, который теперь отражает самые последние версии и редакции, и подытоживается процесс идентификации авторами новых правил и стандартов, выпущенных за последние 10 лет. Также данная работа расширяет масштаб обзора относительно 1998 года и рассматривает не только низко- и высокодеформационное динамическое испытание свай, но и межскважинный акустический каротаж и измерение энергии динамическими пенетрометрами для стандартного испытания на проникновение (СИП, SPT). И наконец, в статье обсуждено внедрение этих правил и стандартов в проектирование и строительство фундаментов. Относительно высокодеформационного испытания, в статье описаны различные подходы международных правил к влиянию используемого метода испытания и его надёжности на расчёт запаса прочности. Многие правила находятся в процессе принятия методов расчёта по коэффициентам нагрузки и устойчивости (РКНИУ, LRFD, load and resistance factor design), которые также рассмотрены в общих чертах. В общем смысле, настоящий обзор правил и стандартов имеет целью использование его в качестве информационного ресурса для компаний-испытателей фундаментов во всём мире.

## 1 Введение

В настоящей статье представлен репрезентативный обзор состояния стандартизации динамических испытаний во всём мире. В сравнении с другими строительными процедурами, динамическое испытание является относительно новой концепцией. Несмотря на то, что в большинстве своём соответствующие методы были разработаны в конце 1960-х – начале 1970-х, попытки их стандартизации во всём мире начались только в конце 1980-х – 1990-х. К 1998 году правила и стандарты распространились достаточно для возможности их компиляции, которая была проведена Beim, J. et al. (1998). Другие обзоры (Goble, 2000; Likins, 2004) были сосредотачивались в основном на высокодеформационном динамическом испытании фундаментов. Настоящая статья ставит целью обновить и развить работу 1998 года, взяв во внимание не только высокодеформационное испытание, но также межскважинный акустический каротаж (МАК, cross-hole sonic logging, CSL), метод импульсного отражения и измерения энергии динамическими пенетрометрами.

Правила, стандарты и спецификации разрабатывались и приводились в исполнение различно для различных стран. Мы начнём с обсуждения некоторых различий и комментариев к терминологии. Раздел 2 обновляет и расширяет международную компиляцию, выполненную Veim, J. et al. (1998). В пункте 2.2 авторы сосредотачиваются в основном на США, страны, где они практикуют, в то время как в пункте 2.3 описаны результаты всемирного обследования, проведённого авторами. Внедрение текущих стандартов испытания фундаментов в проектирование и строительство обсуждено в разделе 3. Пункт 3.1 посвящён стандартам высокодеформационного испытания динамической нагрузкой и обсуждению запасов прочности. Раздел 4 является заключением к настоящей работе.

## 1.1 Разработка и обеспечение выполнения правил и стандартов на уровне государства и частного сектора

Во многих странах правительство занимается надзором за разработкой правил, стандартов и спецификаций, а также за обеспечением их выполнения (Chabot, C. L., 2007). Обычно в результате появляется единый национальный свод правил. В Соединённых Штатах, наоборот, развитие строительных правил и стандартов производится главным образом усилиями частного сектора, ни одна правительственная организация не играет ключевой роли в добровольном развитии стандартов.

Правительство США учредило Национальное бюро стандартов в 1901 году. Тем не менее, американские производители и инженерное сообщество начала XX века сопротивлялось созданию этого органа по Европейской модели. Несколькоми годами ранее, в 1898, в Филадельфии было создано Американское общество испытаний и материалов (сегодня – ASTM International). В этот период Американское общество инженеров-конструкторов и другие профессиональные организации также занимались разработкой стандартных спецификаций для разных отраслей. Уставные документы ASTM провозглашали его приверженность разработке и унификации стандартных методов испытания (ASTM, 1998).

Правила и стандарты, разработанные в США частным сектором, состоят из процедурных рекомендаций, которые ставят целью отразить текущее положение дел и согласованную отраслевую практику, но, в отличие от государственных правил, не являются обязательными к выполнению до тех пор, пока не приняты правительством штата или местным правительством. Исключением является Стандартная спецификация для автодорожных мостов, разработанная Американской ассоциацией служащих автодорожных операций и перевозок (AASHTO), которая является правительственным органом.

## 1.2 Номенклатура и применение

В Veim, J. et al. (1998) указывается, что в большинстве случаев спецификации и стандарты описывают процедуры испытания, в то время как правила обычно описывают практику проектирования и строительства. Спецификации и стандарты часто становятся частью более широких строительных правил, таких как американские Международные строительные правила (IBC, 2006). В то время как мы старались использовать номенклатуру, использованную в исходной работе, мы обратили внимание на мнение авторов, что иногда те и другие документы неотличимы друг от друга, и признаём, что в настоящей работе могут встречаться неправильное употребление терминов. Кроме того,

при обсуждении ситуации в США мы включили в исследование практические руководства, выпущенные отраслевыми организациями.

Динамическое испытание фундаментов часто относят только к высоко- и низкодеформационному динамическому испытанию; в настоящей же работе мы также включили правила и стандарты, относящиеся к МАК и измерениям энергии во время СИП. Низкодеформационное динамическое испытание иногда называется испытанием методом импульсного отражения как в отрасли, так и в настоящей статье.

## 2 Компиляция правил и стандартов

### 2.1 Соединённые Штаты Америки

В США правила, стандарты и спецификации, стандартизирующие, приемлющие или рекомендуемые неразрушающие методы испытания, уже существовали в 1998 году. Десять лет спустя многие стандарты были обновлены и изменены, некоторые в отношении межскважинного акустического каротажа. Эти документы были также широко используемы как государственным, так и частным секторами. Некоторые из наиболее характерных обсуждены в последующих абзацах.

Стандарты ASTM широко принимаются и используются во всём мире в качестве минимальных требований и описания правильного выполнения процедур испытания. ASTM D-4945-0 (ASTM, 2000) стандартизует процедуры выполнения высокодеформационного динамического испытания. Документ был изначально принят в 1986 году, на момент написания статьи он обновляется. Стандарт низкодеформационного динамического испытания, ASTM D-5882-07 (ASTM, 2007), был изначально принят в 1995 году и обновлён в 2007 без значительных изменений. ASTM рекомендует нормализацию результатов стандартного испытания на проникновение (ASTM, 1999) и требует её в случае использования результатов СИП для определения потенциала сжижения песков (ASTM, 2004). Стандарт D-4633-05 (ASTM, 2005), изначально принятый в 1986 году и основательно пересмотренный в 2005, указывает, что единственно допустимый способ определения энергии для нормализации N-значений – при помощи измерений силы и скорости. У ASTM не было стандарта для МАК в 1998 году. ASTM D-6760-02, во время написания настоящей статьи находившийся в стадии обновления без предполагаемых значительных изменений, стандартизовал процедуру МАК и был принят изначально в 2002 году (ASTM, 2002).

Американская ассоциация служащих автодорожных операций и перевозок (AASHTO) и Федеральное управление по автодорогам (FHWA) совместно разрабатывают правила проектирования и руководящие указания для установки фундаментов в транспортных проектах. Государственные автодорожные департаменты (также известные как транспортные департаменты, ТД) принимают спецификации AASHTO, ссылаются на них или модифицируют руководящие документы. Стандартные спецификации для автодорожных мостов (AASHTO, 2003), которая имела в 1998 году и включала раздел о динамическом испытании, была заменена Спецификациями проектирования мостов с учётом КНИУ (AASHTO, 2007). Этот более новый документ разрешает, так же как и предыдущий, испытание либо динамической, либо статической нагрузкой. Документ T-298-99 (AASHTO, 1999), впервые изданный в 1993 году, стандартизует методологию проведения динамического испытания фундаментов на забивных и буровых сваях, микросваях и свай, устанавливаемых при помощи бурового шнека. Большинство ТД штатов (например, в Кентукки, Нью-гемпшире, Огайо, Западной Виргинии и др.) имеют

требования, смоделированные по примеру AASHTO, для разрешения использования высокодеформационных динамических испытаний для подтверждения качества фундамента. Проектные строительные спецификации AASHTO по буровым сваям, как ожидается, укажут, что МАК может использоваться как основной метод инспекции, ссылаясь также на другие неразрушающие методы, такие как метод импульсного отклика. Некоторые ТД штатов (см., например, West Virginia DOT, 2003) уже разрешают использование межскважинного акустического каротажа в буровых сваях; другие, скорее всего, возьмут пример с первых.

До 1999 года в США существовало несколько правил строительства. Некоторые из них будут постепенно ликвидироваться, так как три основных региональных свода строительных правил были объединены в 2000 году в один национальный свод Международных строительных правил (IBC, 2006), согласно которым испытания статической и динамической нагрузками по сути эквивалентны. Эти правила расчёта по допускаемым напряжениям (РДН, ASD, allowable stress design) устанавливают глобальный запас прочности 2.0 для обоих типов испытаний. Аналогично процессу принятия документов AASHTO транспортными департаментами штатов, Международные строительные правила принимаются с изменениями или без штатами, графствами или городами.

Руководство, используемое Армейским корпусом инженеров США в качестве основы планирования, проектирования и строительства свайных фундаментов строительных конструкций (USACOE, 1993) стало доступно отрасли после публикации Американским обществом инженеров-конструкторов. Оно рекомендует инженерам-геотехнологам и конструкторам использовать высокодеформационное динамическое испытание для контроля сваебойных операций и геотехнического анализа существующих конструкций.

Институт фундаментов глубокого заложения (Deep Foundations Institute) выпускает практические руководства для отрасли строительства фундаментов глубокого заложения. В 1998 году он уже признал практику динамического испытания в строительстве (DFI, 1997), а впоследствии выпустил Руководство для неразрушающего испытания и оценки буровых свай (DFI, 2004), которое рекомендует процедуры для МАК, низкодеформационного испытания целостности импульсным откликом и высокодеформационного динамического испытания.

Стандартные указания Американского общества инженеров-конструкторов для проектирования и установки свайных фундаментов (ASCE, 1996) называют динамическое испытание установившейся практикой и принимают подход умножения частичных запасов прочности для получения общего значения. Этот документ на данный момент находится в стадии редактирования, а его проект включает как межскважинный акустический каротаж, так и низкодеформационное испытание целостности, в качестве вариантов оценки качества фундамента. Также ожидается, что он будет включать положения о РДН и РКНИУ, которые обеспечат возможность проектирования более лёгких фундаментов при проведении большего количества испытаний (Likins, 2004).

Спецификации по забивке свай (PDCA, 2007) разрешают контроль качества динамическим испытанием фундамента. Рекомендованные спецификации по проектированию опорных забивных свай (PDCA, 2001) описывают две процедуры проектирования, РДН и РКНИУ, и разрешают выполнение высокодеформационных динамических испытаний. Это документ также предполагает уменьшение запаса прочности, или увеличение коэффициента устойчивости, при увеличении количества испытаний, с тем обоснованием, что большее количество испытаний уменьшает степень неопределённости. Эти отраслевые документы выпущены в форме, позволяющей ссылаться на них в общестроительных правилах.

## 2.2 Другие страны

Информация о правилах, стандартах и спецификациях других стран была получена в основном при помощи заполнения опросного листа (см. Приложение) 472 специалистам, выполняющими динамические испытания того или иного типа. Авторы считают данных специалистов достаточно осведомлёнными о состоянии отрасли в их стране для того, чтобы считать их ответы соответствующими действительности. Сорок девять специалистов из 28 разных стран ответили на опрос.

Было выяснено, что в 1998 году шесть стран, помимо США, имели национальные правила и/или широко принятый отраслевой стандарт для высокодеформационного испытания динамической нагрузкой – Австралия, Бразилия, Великобритания, Германия (на тот момент в черновом варианте), Канада и Китай. Четыре из них (Австралия, Великобритания, Германия и Китай) имели также национальные правила и/или отраслевой стандарт для низкодеформационного динамического испытания. У Франции был последний, но не было первого. У Великобритании, Китая и Франции были документы, стандартизирующие или рекомендующие использование МАК для контроля качества буровых свай (Weim J. et al., 1998). За прошедшие 10 лет многие из этих документов были обновлены или находятся на стадии обновления. Мы отсылаем читателя к работе 1998 года для соответствующих аспектов этих правил; в следующих параграфах обсуждаются в основном изменения в них.

Публикация обновлённой версии Австралийского национального свода правил (SAA, 1995) запланирована на 2008 год и уделит большее внимание испытанию фундаментов, включая, помимо существующих разделов о высоко- и низкодеформационном испытании, положения о межскважинном акустическом каротаже и испытании быстрой нагрузкой (Chambers, 2007).

В Бразилии стандарт испытания высокодеформационной динамической нагрузкой был обновлён в 2007 году и включил дополнительные подробности о процедуре выполнения испытания, калибровке оборудования, а также требование CAPWAP-анализа (в стандарте данная процедура названа по имени) для каждой испытанной сваи (ABNT, 2007)/

В 1998 году единственной провинцией Канады, имевшей правила для динамического испытания, была Онтарио. Хотя CAN/CSA-S6-06, правила мостовых работ провинции (CSA, 2006), до сих пор являются обязательными только в Онтарио, на сегодняшний день они принимаются другими провинциями и муниципалитетами (Gillespie, 2007). Кроме того, Министерство транспорта Британской Колумбии выпустило дополнение к документу провинции Онтарио (British Columbia Ministry of Transportation, 2007), которое включило дополнительные комментарии относительно высокодеформационного динамического испытания и измерений силы и скорости для определения энергии молота при СИП. Данное дополнение является обязательным в Британской Колумбии для проектирования мостов и заменяет CAN/CSA-S6-06. В Канаде все конструкции, кроме мостов, должны соответствовать Национальным строительным правилам Канады (NRCC, 2005). Эти обязывающие правила схожи с двумя другими сводами правил в отношении коэффициентов устойчивости, указанных для динамического испытания.

Китай, страна, которая к 1998 году имела несколько разных спецификаций для разных провинций и свод правил, разрешающих высокодеформационное динамическое испытание фундаментов, теперь имеет мириады документов, регламентирующих не только высокодеформационное, но и низкодеформационное испытание, а также МАК. Эти документы публикуются различными министерствами (государственные обязывающие правила), провинциями, муниципалитетами и неправительственными отраслевыми

организациями. Из методов испытаний, которые авторы исследовали, не стандартизовано только СИП. В таблице 1 представлена детализация информации.

Таблица 1. Спецификации, правила и стандарты в Китае (Liu, 2007)

Название	Серийный номер	Область
Спецификации фундаментных свай при портовом строительстве	(JTJ243-98)	Проектирование и строительство
Спецификации преднапряжённых бетонных трубных свай большого диаметра при портовом строительстве	(JTJ261-97)	Проектирование и строительство
Спецификации динамического испытания свай при портовом строительстве	(JTJ249-2001)	Динамическое испытание свай
Технические спецификации исследования дефектов в бетоне при помощи сверхзвуковых волн	(ECS21.90)	МАК
Спецификации испытания свай статической нагрузкой при портовом строительстве	JTJ255-2002	Статическое испытание свай
Правила испытания несущей способности свай методом автобалансировки	DB32/T291-1999	Испытание свай методом автобалансировки
Технические спецификации свайных фундаментов зданий	JGJ94-94	Проектирование и строительство
Технический спецификации проверки свайных фундаментов зданий	JGJ106-2003	Динамическое и статическое испытание свай
Технические спецификации неразрушающего испытания бетона при портовом строительстве	JTJ/T272-99	Динамическое испытание свай и МАК
Стандарт проектирования фундаментов зданий	(GB50007-2002)	Проектирование

Европейские страны, указанные Veim J. (1998), так же как и другие, обновили свои спецификации и правила. Мы кратко изучили текущую ситуацию, заметив, что Еврокод (который будет обсуждаться подробнее ниже) постепенно меняет ландшафт стандартизации в регионе.

Во Франции правила низкодеформационного испытания (AFNOR, 1993) и межскважинного акустического каротажа (AFNOR, 2000) существовали в 1998 году и с тех пор были обновлены; стандартизация высокодеформационного динамического тестирования появилась, но до сих пор является экспериментальной (AFNOR, 1997).

В 1998 году существовало и исполнялось несколько немецких правил DIN, относящихся к фундаментам, однако процедуры проведения динамических испытаний (на основе рекомендаций Немецкого геотехнического общества) развились за прошедшее десятилетие с чернового до финального варианта как для низкодеформационных, так и для высокодеформационных испытаний (DGGT, 2007)

Как и в Соединённых Штатах, в Великобритании не существует государственных правил по рассматриваемому вопросу. Тем не менее, отрасль уже долгое время следует спецификациям Института инженеров-строителей для низко- и высокодеформационных динамических испытаний. На сегодняшний день этот документ находится во второй редакции (ICE, 2007).

В Швеции ведутся работы по сопоставлению рекомендаций Комиссии по исследованиям свай и Шведского геотехнического института и последней редакции национального свода правил для автодорожных мостов (SNRA, 2004) с Европейскими стандартами, которые будут введены в течение года или двух (Grävare, 2007).

Наше исследование также показало, что существует некоторое количество стран, где стандартизация фундаментных испытаний либо не была замечена Beim J. (1998), либо развилась в прошедшие 10 лет.

Национальные правила для низкодеформационного испытания целостности (VMC, 2005a) и межскважинного акустического каротажа (VMC, 2005b), основанные на стандартах ASTM, теперь существуют во Вьетнаме. Правил по высокодеформационному динамическому испытанию нет.

В Аргентине, несмотря на отсутствие государственных правил или спецификаций, высокодеформационные динамические испытания теперь иногда требуются властями правительств. Низкодеформационные испытания, хотя и не принимаемые для мостовых фундаментов, часто требуются частными владельцами. Межскважинный акустический каротаж недавно начал применяться в обязательном порядке некоторыми транспортными властями провинций (Prato, 2007).

Египетские правила механики грунтов и фундаментов, впервые выпущенные в 1991 году, отражают использование и приемлемость низкодеформационного и высокодеформационного динамического испытания свай и связанных анализов. В последней редакции (RCHBPP, 2006) правил описано и принято использование испытания целостности при помощи межскважинного акустического каротажа.

Хотя у Мексики и нет национального свода правил для испытания фундаментов, свод правил Мехико (Mexico DF, 2004) теперь базируется на расчёте КНИУ и указывает на высокодеформационное испытание как альтернативный метод.

Аналогичная ситуация существует на Филиппинах – спецификации для испытания фундамента зависят от расположения и природы проекта. Для зданий этажностью больше 4 и в больших городах, таких как Манила, а также для правительственных проектов, требуются испытания целостности (низкодеформационные или МАК) и нагрузочные испытания (динамические или статические) (Reyes, 2007).

Департамент общественных сооружений правительства Малайзии на текущий момент финансирует разработку правил и спецификаций высокодеформационного испытания свай (JKR, 2005).

Спецификация Министерства наземного транспорта Индийского дорожного конгресса (MOST, 1988), пересматриваемая на текущий момент, вкратце затрагивает динамическое испытание свай. Индия также имеет базовый документ для испытания методом импульсного отражения (BIS, 2001), который должен быть пересмотрен в будущем (когда – пока не сообщается). Для МАК правил или спецификаций в Индии нет (Vaidya, 2007).

Строительные спецификации Катара (QCS, 2002) разрешают «альтернативные методы испытания свай», включая метод импульсного отклика и акустический каротаж для контроля целостности и испытание динамической нагрузкой для определения несущей способности.

Датский Свод правил для проектирования и строительства фундаментов (DGI, 1998) разрешает выполнение испытаний динамической нагрузкой в качестве варианта (хотя и с тем же частичным коэффициентом запаса прочности, что и «датская формула забивки»), но не говорит ничего о методе импульсного отклика или межскважинном акустическом каротаже. С января 2008 года в силу вступит Еврокод с одобренным датским приложением.

Аналогично, польский свод правил некоторым образом описывает высокодеформационное испытание, но не методы испытания целостности (PCSN, 1983). На данный момент он используется совместно с предварительными нормами Еврокода (Maciocha, 2007).

Появление Еврокода – одно из наиболее важных событий в стандартизации за прошедшие 10 лет, и оно, несомненно, затронет большое количество стран. Конструктивные Еврокоды, обычно называемые просто Еврокодами, – это набор из десяти европейских стандартов, содержащих общие конструктивные правила для проектирования зданий и конструкций. Еврокоды разрабатываются CEN (Comité Européen de Normalisation), Европейским комитетом по стандартизации, который состоит из национальных органов всех стран Европейского Союза плюс Исландии, Норвегии, Швейцарии и Лихтенштейна (CEN, 2007). Том 7 Еврокода относится к геотехническому проектированию (CEN, 1997).

Каждая европейская страна на сегодняшний день разрабатывает национальные приложения, которые локализуют и дополняют Еврокод. Эти приложения будут приняты и сделаны обязательными в каждой стране. Национальные приложения будут включать Национально определённые параметры, специфичные для каждой страны-участника. Эти национальные параметры позволят членам ЕС выбирать уровень безопасности, применимый к работам на их территории, будут содержать данные, специфичные для страны, и, если Еврокодом будут разрешены альтернативные методы, указывать метод, который должен будет использоваться в этой стране. Национальные приложения, однако, не могут изменять никакие положения Еврокода (CEN, 2003).

Еврокод представляет из себя свод правил с прогрессивным расчётом КНИУ (Likins, 2004), который разрешает высокодеформационное динамическое испытание, указывает минимальное количество нагрузочных испытаний на площадку и разрешает использование меньшего запаса прочности, если проведено большее количество испытаний (статических или динамических).

Еврокод также разрешает низкодеформационное динамическое испытание для оценки целостности, но не является определяющим в отношении МАК (Klingmüller, 2007).

Что касается стандартных испытаний на проникновение, в европейском стандарте, разработанном совместно Европейским комитетом по стандартизации и Международной организацией по стандартизации, указывается, что энергия забивки на удар должна проверяться каждые шесть месяцев. Рекомендуемый метод определения фактической энергии – измерением силы и скорости (CEN, 2005).

Полагаясь на ответы опрошенных экспертов из европейских стран, авторы считают, что национальные приложения последуют Еврокоду 7 в отношении рекомендаций по динамическому испытанию фундаментов.



В данном разделе обсуждается, каким образом философия репрезентативного набора правил, обсуждённых в разделе 2, влияет на практику проектирования и строительства. Мы рассмотрим каждый из основных типов динамических испытаний отдельно.

### 3.1 Высокодеформационное динамическое испытание

Во многих странах, включая США, наблюдается тенденция внедрения правил и стандартов на основе КНИУ. Согласно этим правилам, фундаменты должны быть спроектированы для необходимой «номинальной устойчивости» (также известной под названием «характеристической или предельной несущей способности»), которая, уменьшенная на коэффициент устойчивости или частичный коэффициент, должна давать значение, превышающее расчётную нагрузку. Согласно РКНИУ, различным нагрузочным условиям свойственны различные неопределённости, и поэтому им присваиваются различные коэффициенты нагрузки (Likins, 2004). Аналогичным образом, коэффициенты устойчивости различаются между методами верификации нагрузки и иногда между количеством проведённых испытаний. В зависимости от правил и страны, номинальная устойчивость либо умножается на коэффициенты устойчивости, получая меньшее значение, либо делится на них, получая большее значение; в любом случае, конечный результат по сути тот же, и значение с учётом коэффициента больше для более точных методов определения устойчивости и меньше для менее точных.

В американских правилах с использованием КНИУ AASHTO (AASHTO, 2007) ставится цель калибровки коэффициентов нагрузки и устойчивости согласно фактической статистике по мостам (FHWA, 2007). К счастью, аварии фундаментов являются событиями, случающимися редко (но метко), что ограничивает возможность статистического анализа. Коэффициенты устойчивости, указанные в правилах AASHTO, иногда приводят к запасам прочности, значительно отличающимся от существующей практики в США (Rausche et al., 2007).

Согласно некоторым из правил, исследованным в настоящей работе, статические и динамические испытания считаются эквивалентными, что приводит к одинаковым запасам прочности после прохождения любого из этих испытаний. Такова ситуация в Бразилии (ABNT, 2007), Германии (DGGT, 2007), разрабатываемым спецификациям в Малайзии (JKR, 2005) и своду правил IBC (IBC, 2006). Это объясняется тем, что динамическое испытание считается в общем статистически консервативным, производится для забивных свай в конце забивки (до отдыха сваи, после которого несущая способность увеличивается) и обычно проводится на значительно большем количестве свай, чем статическое, что обеспечивает лучшее покрытие территории строительства и таким образом снижает риск аварии.

В правилах других стран (Австралия, Канада, европейские страны) динамическому испытанию присваивается больший запас прочности, чем статическому (типичная разница – 10%). Это обычно объясняется тем, что статическое испытание является стандартом, а разница в 10% способствует покрытию статистической изменчивости между испытаниями. Однако, необходимо заметить, что различные подходы к интерпретации статических испытаний могут привести к расхождению в оценке критической нагрузки вплоть до двух раз (Duzceer and Saglamer, 2002).

Некоторые документы, такие как австралийский (SAA, 1995), Еврокод 7 (CEN, 1997), немецкий (DGGT, 2007) и шведский (SNRA, 2004), ASCE (1996) и PDCA (2001) позволяют уменьшать запас прочности в зависимости от объёма проведённых испытаний. Чем больше испытаний, и чем точнее метод испытания, тем ниже общий запас прочности для проектирования. Хотя дополнительные испытания увеличивают общую надёжность

фундамента, использование меньшего запаса прочности приводит к менее консервативному расчёту. Уменьшение общих строительных издержек обычно достаточно значительно и компенсирует стоимость дополнительных испытаний (см. пример в Приложении Б). В то время как в некоторых странах нет спецификаций относительно необходимого объёма испытаний, другие – например, Бразилии, Канаде, Китае и Германии – рекомендуют испытание определённого процента от общего количества свай. Еврокод 7 рекомендует не процент, а абсолютное количество свай, которые должны быть испытаны. Такой подход приводит к тому, что необходимый процент свай для испытания больше для маленьких проектов и меньше для больших.

### 3.2 Низкодеформационное динамическое испытание и межскважинный акустический каротаж

В прошедшее десятилетие всё больше осознавалась необходимость верификации структурной целостности элементов фундамента, в особенности буровых и буронабивных фундаментов, которые не могут быть проинспектированы визуально до установки, и которые устанавливаются всё более разнообразным оборудованием и методами. Это привело к увеличению количества документов, рекомендующих или обязывающих к выполнению испытаний методом импульсного отклика или МАК.

Стоит отметить Францию, которая включила как временной, так и спектральный анализы в стандартные процедуры (AFNOR, 1994).

Насколько могло быть определено нашим исследованием, до 2002 года единственной страной, имевшей спецификацию для проведения МАК была Франция (AFNOR, 2000). Принятие стандарта D6760 (ASTM, 2002) дало фундаментной отрасли ещё одну спецификацию проведения этого испытания, на которую некоторые из респондентов наших опросов сослались, как на де-факто стандарт в их странах.

### 3.3 Измерение энергии СИП

Единственными существенными документами, выявленными нашим исследованием, описывающими измерение силы и скорости для калибровки энергии при СИП, стали стандарты ASTM (ASTM 1999, 2004 и 2005) и европейский стандарт, разработанный совместно с ISO (CEN, 2005). В США, однако, некоторые автодорожные департаменты штатов (Огайо, Миннесота и др.) требуют периодической калибровки оборудования для СИП в спецификациях на строительство.

## 4 Выводы и взгляд в будущее

Хотя мы и попытались исследовать большое количество стран и представить обстоятельный обзор, результаты, представленные в настоящей статье, ни в коей мере не являются исчерпывающими, и вполне возможно некоторые страны с подходящими документами не были упомянуты. Тем не менее, мы считаем, что предоставили полезный ресурс для специалистов и людей, желающих внести вклад в развитие стандартной документации в своих странах.

В общем и целом, ответы на наш опросный лист показали существование нескольких сводов правил, разрешающих или рекомендующих практику динамического испытания

фундаментов, и широкое распространение стандартов правильного проведения таких испытаний.

Там, где национальные стандарты или спецификации не упоминают того или иного метода динамического испытания, в подавляющем большинстве исследованных стран (например, Бразилия, Египет, Гонконг, Индонезии, Кувейт, Мексика, Филиппины, Катар, Саудовская Аравия, Таиланд, Вьетнам) стандарты ASTM принимаются как минимальные требования к проведению работ.

Глядя в будущее, можно отметить значительную важность тенденции перехода к спецификациям на основе КНИУ и принятии динамических испытаний Еврокодом. Последний может дать импульс более широкому распространению динамических испытаний в разных странах Европы.

Авторы предвидят продолжение тенденции внедрения стандартов, разрешающих уменьшение запасов прочности при проведении большего объёма испытаний, таким образом давая отрасли возможность осознать преимущества программ динамического испытания.

Что касается измерения силы и скорости с целью калибровки энергии для СИП, ожидается, что принятие EN ISO 224760-2 (CEN 2005) европейскими странами увеличит доверие к этим методам калибровки.

На фронте испытания целостности, количество правил и спецификаций, относящихся к межскважинному акустическому каротажу, по-прежнему относительно мало. Авторы относят это, по крайней мере частично, к ещё относительно недавнему принятию документа ASTM, стандартизирующего процедуры МАК (ASTM, 2002). Документ ASTM, стандартизирующий высокодеформационное динамическое испытание был, напротив, принят ещё в 1986 году. Авторы полагают, что в ближайшие десятилетия по всему миру будет появляться всё больше правил и спецификаций для МАК.

Мы воодушевлены тем, что исследование правил и стандартов динамического испытания фундаментов подтвердило предсказание (Beim, J. et al., 1998) появления многих новых нормативных документов в этой области. Мы ожидаем сохранения положительного тренда в последующие годы.

## Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность респондентам, заполнившим опросный лист, приведённый в Приложении А. Эта статья никогда бы не была написана без вклада следующих людей (в алфавитном порядке стран):

contributions: Carlos A. Prato, National University of Córdoba, Argentina; Alex Gibson, Geoforce Pty Ltd, Australia; William Chambers, Leighton Abigroup Joint Venture – Gateway Upgrade Project, Australia; David Klingberg, Wagstaff Piling, Australia; Nasar Mahmoud, Bangladesh; Alessander Kormann, In Situ Geotecnia, Brazil; Don Gillespie, British Columbia Ministry of Transportation, Canada; James (Jian Zhong) Jin, Golder Associates Ltd, Canada; MaKeGang, AnHui Electric Power Design Institute, China; Edward Liu, Fourth Harbor Engineering Co, China; Liqun Liang, Pile Dynamics, Inc., USA; M. Zhong, China; Michal, Duba Testing, Czech Republic; Rikard Skov, CPTest, Denmark; Essam El Gizawy Pile Testing of Egypt; Martin Hamman, G-Octopus, France; Ernst Niederleithinger, BAM, Germany; Oswald Klingmueller, Palanalys, Germany; Angus Kong, Fugro Technical Services, Hong Kong; W.Lee. Tse, Hong Kong; Ravikiran Vaidya, Geo Dynamics, India; Aksan Kawanda, Geotech Engineering, PT, Indonesia; Gouw Tjie-Liong, Indonesia; Henki Wibowo Ashadi, University of Indonesia; Giorgio Pezzetti, FIELD S.r.l., Italy; Gianfranco Rocchi, Studio Geotecnico Italiano, Italy; Todo Hiroaki, Japan; Aly A. Mohamed and George J. Bakas, Edrasis Middle East, Kuwait; Teh Kim Ong, T Testing Engineers, Malaysia; Antonio Mendez, Mexico; Walter I. Paniagua, PILOTEC, Mexico; Francisco Blanco, Tecnosuelo SA de CV, Mexico; Oluwatoyin Omole, Foundation Construction Ltd, Nigeria; Gerry Reyes, Philtech, Philippines; Amadeusz Maciocha, PMC Polska Sp. z o.o., Poland; Ghaleb Al-Zubi, ACES, Qatar; C. Anbalagan, Gulf Consult, Saudi Arabia; Al Griffith, Saudi Aramco, Saudi Arabia; Carl-John Grävare, Palanalys, Sweden; Pavel Žvanut, Slovenia; Gorazd Strnisa, SLP, Slovenia; Rafael Gil and José L. Arcos, Kronsa, Spain; Thanabat Uaworakunchai, STS Instruments Co., Ltd, Thailand; Matthew Julien, TTPlan, Trinidad and Tobago; Rolando P. Rosano Capital Signal Co., Ltd, Trinidad and Tobago; Peter Kennedy, Tiscali, UK; Jon Ball, Roger-Bullivant, UK; Bui Hoang Duong, Vietnam; Nguyen Van Thinh, Building Science & Technology, Vietnam; Nguyen Viet Tuan, IBST-Vietnam; Duong Hiep, Vietnam; N.M Toan, Vietnam.

## Список литературы

AASHTO (1999) American Association of State Highway Officials. "Standard Methods of Test for High-Strain Dynamic Testing of Piles" AASHTO T198-93, Washington DC, USA.

- AASHTO (2003) American Association of State Highway Officials. "Standard Specification for Highway Bridges 16<sup>th</sup> edition and interims (1997–2003)", Washington DC, USA.
- AASHTO (2007) American Association of State Highway Officials. "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units" 4th Edition, Washington DC, USA.
- ABNT (2007) Associação Brasileira de Normas Técnicas "NBR 13208 – Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico – R06/2007", Brazil (in Portuguese).
- AFNOR (1993) Association Française de Normalisation. "NF P94-160-2 Sols: reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation – Partie 2: méthode par réflexion", France (in French).
- AFNOR (1994) Association Française de Normalisation "NF-P94-160-4 Sols: reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation – Partie 4: méthode par impédance", France (in French).
- AFNOR (1997) Association Française de Normalisation. "XP P94-152 Sols: reconnaissance et essais – Essai de chargement dynamique axial d'un élément de fondation profonde", France (in French).
- AFNOR (2000) Association Française de Normalisation. "NF P94-160-1 Sols: reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation – Partie 1 : méthode par transparence", France (in French).
- ASCE (1996) American Society of Civil Engineers. "Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundation" (ASCE 20-96), Reston, VA, USA.
- ASTM (1998) "The History of ASTM International". [http://www.astm.org/IMAGES03/Century\\_of\\_Progress.pdf](http://www.astm.org/IMAGES03/Century_of_Progress.pdf).
- ASTM (1999) Standard D1586-99 – "Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- ASTM (2000) Standard D4945-00 – "Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- ASTM (2002) Standard D6760-02 – "Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- ASTM (2004) Standard D6066-96 – "Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- ASTM (2005) Standard D4633-05 – "Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- ASTM (2007) Standard D5882-07 – "Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles." ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, USA.
- BIS (2001) Bureau of Indian Standards. IS 14893(Part 0/ Sec 0):2001 "Guidelines for non-destructive integrity testing of piles", India.
- Beim, J., Grävare, C. J., Klingmüller, O., De-Qing, L. and Rausche, F. (1998) "Standardization and Codification of Dynamic Pile Testing, a Worldwide Review". Deep Foundations Institute, USA.
- British Columbia Ministry of Transportation. (2007) "Bridge Standards and Procedures Manual vol. 1", Canada.
- CEN (1997) European Committee for Standardisation "Eurocode 7: Geotechnical design", Brussels, Belgium.
- CEN (2003) European Committee for Standardisation. "Policy and Guidelines Procedures for CEN/EC 250 Structural Eurocodes", Brussel, Belgium.
- CEN (2007) "European Committee for Standardisation". <http://www.cen.eu/cenorm/aboutus/structure+/nationalmembers/index.asp>.

- CEN (2005) "European Committee for Standardisation. EN ISO 22476-2:2005 Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 2: Dynamic probing", Brussels, Belgium.
- CSA (2006) Canadian Standard Association, "Canadian High-way Bridge Design Code CAN/CSA-S6-06", Canada.
- Chabot, C. L. (2007) "Structural Engineering Codes and Standards in the United States, an Overview." *Structure Magazine*, Vol. 14 No. 8, August 2007, p.63, USA.
- Chambers, W. (2007) Personal communication.
- DGI (1998) "Danish Geotechnical Institute Code of Practice for foundation engineering DS415", 1998-04-02, Denmark.
- DFI (1997) Deep Foundation Institute "Inspector's Manual for Driven Pile Foundations." USA.
- DFI (2004) Deep Foundation Institute. "Manual for Non Destructive Testing and Evaluation of Drilled Shafts." USA.
- DGGT (2007) German Society of Geotechnics. "EA Pfähle", Germany (in German).
- Duzceer, R. and Saglamer, A. (2002) "Evaluation of Pile Load Tests Results". Proceedings of the Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations, Nice, June 3-5, 2002, pp 637-644. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France.
- FHWA (2007) Federal Highway Administration, "Load and Resistance Factor Design". <http://www.fhwa.dot.gov/crt/lifecycle/lrfd.cfm>.
- Gillespie, D. (2007) Personal communication.
- Goble, G.G. (2000) "LRFD design codes for pile foundations – A review". Application of Stress-Wave Theory to Piles, Niyama & Beim (eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Grävare, C.J. (2007) Personal Communication.
- ICE (2007) Institution of Civil Engineers. "Specification for piling and embedded retaining walls", 2<sup>nd</sup> edition, London, UK.
- IBC (2006) "International Building Code". Falls Church, VA, USA.
- ICE (2007) Institution of Civil Engineers "specification for piling and embedded retaining walls", 2<sup>nd</sup> edition, London, UK
- JKR (2005) Jabatan Kerja Raya, Public Works Department of the Government of Malaysia. Research Report No: JKR 20601-LK-0096-GT-05 (Dec 2005): Vol I: "Guidelines for Installation and Quality Control of Driven Piles using High Strain Dynamic Pile Test". Vol III: Specifications For High Strain Dynamic Pile Testing, Malaysia.
- Klingmüller, O. (2007) Personal communication.
- Likins, G. E., (August, 2004) "Pile Testing – Selection and Economy of Safety Factors". Current Practices and Future Trends in Deep Foundations, Geotechnical Special Publication No. 125, DiMaggio, J. A., and Hussein, M. H., Eds, American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA; 239-252.
- Liu, E. (2007) Personal Communication.
- Maciocha, A. (2007) Personal Communication.
- México DF, Gobierno Del Distrito Federal (2004) "Normas Técnicas Complementarias Del Reglamento De Construcciones Para El Distrito Federal 2004 1", México (in Spanish).
- MOST (1988) Ministry of Surface Transport. "Specification from the Indian Roads Congress". MOST Specifications-IRC Section: 1100, India.
- NRCC (2005) National Research Council Canada. "National Building Code of Canada".
- PDCA (2001) Pile Driving Contractors Association. "Recommended Design Specifications for Driven Bearing Piles" Third Edition, USA.
- PDCA (2007) "Pile Driving Contractors Association. Installation Specification for Driven Piles", USA.
- PCSN (1983) Polish Committee of Standard and Normalisation PN-83/B-02482 "Nośność pali i fundamentów palowych." (Foundations Bearing capacity of piles and pile foundations), Poland (in Polish).
- Prato, C. A. (2007) Personal communication.
- QCS (2002) "Qatar Construction Specifications Section 4 Part 11", Qatar.
- Rausche, F., Likins G. and Hannigan, P. (2007) "Capacity Confusions in 2007". GRL and PDI Newsletter, April 2007, Cleveland, OH, USA.
- RCHBPP (2006) Research Center for Housing, Building and Physical Planning. "Egyptian Code for Soil Mechanics and Foundations", vol. 4, Egypt.
- Reyes, G. (2007) Personal communication.
- SAA (1995) Standards Association of Australia, "Australian Standard Piling Code AS2159-1995 Piling – Design and installation code", Australia.
- Swedish Commission on Pile Research (1992) "IVA Palkommissionen Rapport 89", Sweden (in Swedish).
- Swedish Geotechnical Institute (1993) "Pålgrundläggnings-handboken". (Piling handbook), Sweden (in Swedish).
- SNRA (2004) Swedish National Road Administration. "Swedish Road Department Code" (Bro 2004) BR094, Sweden.
- USACOE (1993) US Army Corps of Engineers. "Design of Pile Foundations (Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineers, No. 1)", American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Vaidya, R. (2007) Personal communication.
- VMC (2005a) Vietnam Ministry of Construction. TCXDVN – 359: 2005, Vietnam.
- VMC (2005b) Vietnam Ministry of Construction. TCXDVN – 358: 2005, Vietnam.
- WV DOT (2003) West Virginia Department of Transportation. "Supplemental Specifications to accompany the 2000 edition of the Standard Specifications Roads and Bridges", West Virginia, USA.

## Приложение А

- 1) Есть ли в вашей стране национальный свод правил, относящийся к фундаментам или имеющий раздел, посвящённый им?
- 2) Если вы ответили «да» на первый вопрос, обязывает ли правительство к выполнению этого свода правил?
- 3) Если обязывающего национального свода правил нет, есть ли какие-либо неправительственные отраслевые стандарты, спецификации, правила или рекомендации, которым следует фундаментная отрасль?
- 4) Если ваша страна расположена в Европе, необходимо ли вам работать в соответствии с Еврокодом?
- 5) Какие правила, стандарты, спецификации, руководства или рекомендации, существуют в вашей стране для (укажите полное имя документа, с указанием года последней редакции. Перечислите все применимые документы):
  1. Высокодеформационное динамическое испытание фундамента (PDA)
  2. Низкодеформационное динамическое испытание фундамента (PIT, импульсный отклик)
  3. Межскважинный акустический картаж (CSL)
  4. Измерение энергии SPT-молотов
- 6) Если в вашей стране нет нормативной документации, относящейся непосредственно к процедурам испытания фундаментов, используете ли вы американский или английский стандарты или стандарты другой страны (укажите страну или название документа)?
- 7) Есть ли у вас какие-либо комментарии по теме нормативной документации?

## Приложение Б

Полный коэффициент запаса прочности при РКНИУ определяется комбинацией пониженной устойчивости (по отношению к номинальной, или характеристической устойчивости, определённой при нагрузочном испытании) и увеличенных нагрузок. Уменьшение полного запаса прочности – не просто абстрактная идея, а ведёт к значительной экономии, что показано в примере на основе американского стандарта PDCA (PDCA, 2001). Данный код указывает коэффициент запаса прочности для различных методов оценки несущей способности.

Пусть задана нагрузка на колонну в 2000 тонн и предельная несущая способность одной сваи 200 тонн. Для каждого метода оценки несущей способности, расчётная нагрузка вычисляется делением 200 тонн на соответствующие коэффициент запаса прочности. Необходимое количество свай получается делением полной нагрузки на колонну на расчётную нагрузку сваи, как показано в таблице 2.

В данном примере больший процент испытания свай и использование более надёжного метода оценки несущей способности приводит к необходимости меньшего количества свай. Показано уменьшение необходимого количества свай вплоть до двух раз. В большой конструкции с множеством колонн, уменьшение этого количества может дать существенную экономию средств. В сводах правил, проповедующих подобную философию (Еврокод 7, австралийский), увеличение количества испытаний не только приводит к более надёжному фундаменту, но и к менее дорогому, в особенности для больших проектов.

Таблица 2. Проектирование фундамента на основе спецификаций PDCA

Метод	Коэффициент запаса прочности	Расчётная нагрузка (тонн)	Необходимое количество свай
Динамическая формула	3.5	57	35
Волновое уравнение	2.5	80	25
Динамическое испытание 2%	2.1	95	21
Динамическое испытание 10%	1.9	105	19
Статическое испытание 0.5%	2.0	100	20
Статическое испытание 2%	1.8	111	18
Динамическое испытание 15% плюс одно статическое испытание	1.65	121	17

Проценты указаны от общества количества свай