

МРНТИ 67.13.21

И.И. Бекбасаров¹ – основной автор, | ©
Е.И. Атенев², Н.А. Шаншабаев³



¹Д-р техн. наук, ²PhD, ³ PhD

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0003-3250-7853> ²<https://orcid.org/0000-0002-2907-6610>

³<https://orcid.org/0000-0003-4930-0488>



^{1,2,3}Таразский университет им. М.Х. Дулати



Тараз, Казахстан



¹ii.bekbasarov@dulaty.kz

<https://doi.org/10.55956/YOUN3512>

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ И РОСТВЕРКА, УСТРОЕННОГО В ВЫШТАМПОВАННОМ КОТЛОВАНЕ

Аннотация. Изложены результаты анализа формул, предназначенных для определения сопротивления свай по результатам динамических испытаний. Выявлены их недостатки. Установлено, что существующая методика проведения динамических испытаний, и применяемые формулы, не адаптированы к условиям устройства комбинированного свайного фундамента, в котором ростверк, устраивается в котловане, выштампованном в околосвайном грунте. Определен перечень технологических операций и порядок проведения динамических испытаний комбинированного свайного фундамента. Для выполнения испытаний предложено использовать стальной полый шаблон, имитирующий штамп. Приведены исходные предпосылки, характеризующие особенности взаимодействия элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт», при ударе молота, и на их основе составлены уравнения энергетического баланса для двух ударных режимов работы дизельных молотов (без подачи и с подачей топлива в камеру сгорания молота). На основе уравнений энергетического баланса получены формулы по определению динамического сопротивления грунта, внедрению шаблона штампа и сваи, при ударе. Формулы учитывают характер деформирования грунта при погружении сваи и шаблона штампа, а также динамические параметры элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт» (динамические нагрузки, динамические деформации, коэффициент динамичности по нагрузке и деформациям). Предложена формула по определению статического сопротивления сваи и свайного ростверка в виде разницы между динамическим и вязким сопротивлением грунта, которая зависит от скорости перемещения сваи при ударе молота.

Ключевые слова: свая, штамп, молот, шаблон, ростверк, грунт, удар, сопротивление, вязкое сопротивление, отказ, скорость, коэффициент динамичности, модуль упругости.



Бекбасаров, И.И. Динамический метод оценки несущей способности сваи и ростверка, устроенного в выштампованном котловане [Текст] / И.И. Бекбасаров, Е.И. Атенев, Н.А. Шаншабаев // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №2(92). – С.279-314. <https://doi.org/10.55956/YOUN3512>

Введение. Известно, что забивка свай в грунтовое напластование представляет собой сложный динамический процесс. Это обусловлено тем, что при погружении свай передача энергии удара молота к грунту осуществляется через соударение множества элементов системы «молот-свая-грунт», обладающих разной прочностью, разной толщиной и находящихся в разном состоянии. Но, несмотря на это, теоретический и практический интерес к изучению этого процесса со стороны специалистов достаточно высок. Данное обстоятельство, прежде всего, продиктовано возможностью оперативной оценки несущей способности свай по результатам ее забивки (динамических испытаний в конце погружения). Это позволяет отказаться от определения несущей способности свай путем проведения трудоемких и продолжительных во времени статических испытаний. Несомненно, практическая реализация такой возможности способствует повышению экономичности и значительному снижению сроков возведения строительных объектов.

В настоящее время в сфере свайной геотехники существуют множество решений (формул), предложенных для определения несущей способности свай на основе их динамических испытаний. По сведениям работы [1] их общее количество составляет более 200, что само по себе свидетельствует, об актуальности данной проблемы, и огромном стремлении специалистов к ее решению. В целом, все известные формулы, предназначенные для реализации динамического метода оценки несущей способности свай, можно разделить на следующие 5 групп:

- 1) Формулы, полученные на основе закона сохранения механической энергии [2-13];
- 2) Формулы, составленные на основе закона сохранения импульса (количества движения) [14,15];
- 3) Формулы, разработанные на основе использования положений волновой теории удара [16-20];
- 4) Формулы, представляющие собой корреляционные зависимости, полученные по результатам экспериментальных исследований [1,21-25];
- 5) Формулы, базирующиеся на законах Ньютона [26,27].

Для каждой из представленных групп динамических формул, характерны свои преимущества и недостатки, обусловленные исходными теоретическими и экспериментальными положениями, принятыми при их разработке. В силу этих причин они обладают разным уровнем достоверности и разной областью практического применения. Кроме расчетных формул, несущая способность свай по результатам их динамических испытаний, определяется и численными методами. При этом используются программные комплексы, разработанные на основе метода конечных разностей [25] и принципов волновой теории удара [27-31].

В СНГ, в том числе и в Казахстане, в строительной отрасли, для определения сопротивления забивных свай (по результатам динамических испытаний), применяются решения, основанные как на законе сохранения механической энергии, так и на принципах волновой теории. Так в состав свода строительных правил [32] входит модифицированная формула Н.М. Герсеванова и формула Б.В. Бахолдина, полученные на основе уравнений энергетического баланса процесса ударного погружения свай, а стандарт [33] предусматривает проведение динамических испытаний методом, позволяющим использовать принципы волновой теории удара. Метод, основанный на волновой теории [33], позволяет приближенно оценивать

сопротивление грунта по боковой поверхности сваи и под его нижним концом. С помощью данного метода можно моделировать зависимость осадки сваи от вдавливающей нагрузки.

Формула Н.М. Герсеванова, входящая в состав действующего свода правил [32], по сравнению с другими динамическими формулами является наиболее «жизнеспособной», так как она активно используется более 70 лет. За годы применения формулы, специалистами был выдвинут ряд предложений по ее совершенствованию. Эти предложения, в основном, касались:

- достоверности определения энергии удара молота, при использовании дизельных молотов для проведения динамических испытаний свай [34-39];
- учета упругих деформаций грунта и сваи при ударе молота [3,4,11,13,21,34];
- дифференцированного назначения коэффициента η , принимаемого в формуле Н.М. Герсеванова в зависимости от материала сваи и способа проведения динамического испытания [25,34,40-43];
- учета вязкого сопротивления грунта при погружении сваи [7-13].

Принимая во внимание перечисленные факторы, отечественными и зарубежными специалистами были разработаны различные варианты формул, близких по структуре к формуле Н.М. Герсеванова. Подавляющее большинство из них не получили надлежащего применения в геотехнической практике. Исключением является формула Б.В. Бахолдина, которая в настоящее время входит в состав свода строительных правил [32], и регламентирована к применению при остаточном отказе сваи 3 мм и более. Данная формула, позволяет выполнять расчеты с учетом вязкого сопротивления грунта при ударе молота по свае.

Анализ вышеупомянутых формул (в том числе формул, входящих в состав свода строительных правил [32]), базирующихся на уравнениях энергетического баланса ударного процесса, позволяет утверждать, что все они, несмотря на их научную и практическую ценность, не лишены недостатков. Ниже, нами рассмотрены эти недостатки с позиции их влияния на энергетические затраты молота при ударе по свае.

Так при забивке сваи, энергия удара работающего дизельного молота зависит от объема (расхода) топлива, поступающего в камеру сгорания молота, и сгораемого в нем, при ударе. Из работ [38,39] следует, что увеличение объема топлива, сопровождается увеличением энергии удара молота, а уменьшение объема топлива, наоборот – его уменьшением. Поэтому при определении сопротивления сваи по результатам производственной забивки дизельным молотом энергия ее удара должна устанавливаться с учетом данного фактора. Но, к сожалению, существующие формулы не предоставляют такую возможность.

Как известно при ударе молота, наряду со сжатием ствола сваи, происходит также и сжатие шабота молота, элементов наголовника и амортизатора в нем. При этом шабот и элементы наголовника могут претерпевать, в основном, упругие деформации, а амортизатор, как и свая, могут иметь как упругие, так и пластические (остаточные) деформации. Следовательно, часть энергии удара молота, затрачивается и на сжатие этих соударяющихся элементов. Поэтому для вывода достоверной формулы по определению сопротивления сваи, важно в уравнении энергетического баланса учитывать затраты молота на сжатие шабота, элементов наголовника

и амортизатора. В существующих формулах эти энергетические затраты либо не учитываются, либо учитываются обобщенно (упрощенно).

При погружении сваи, до удара молота, к свае прикладывается статическая нагрузка от массы самого молота, массы наголовника и амортизатора в нем. В процессе удара указанные элементы перемещаются вниз за сваей, что, несомненно, сопровождается соответствующими затратами энергии молота. Несмотря на то, что данное явление, реально имеет место на практике и не оспаривается специалистами, оно не принимается во внимание при выводе формул.

В большинстве случаев (за исключением процесса забивки сваи в слабые грунты) после удара по свае происходит подскок ударной части молота. Подскок ударной части молота, происходит за счет действия сил упругого отпора грунта. Эти силы, направлены вверх, и до подбрасывания ударной части молота на некоторую высоту, осуществляют подъем как самой сваи, так и амортизатора, наголовника и молота (за исключением его ударной части) на высоту, равную величине упругого отпора сваи. Наличие и проявление сил упругого отпора свидетельствует о том, что часть энергии молота, после ударного контакта возвращается обратно молоту. Если факт отскока ударной части молота в ряде существующих формулах учитывается, то факт подъема перечисленных ударяющихся элементов системы «молот-свая-грунт» (за счет сил упругого отпора грунта) пренебрегается.

Кроме вышеуказанных недостатков существующих формул, относящихся к энергетическим затратам молота, имеют место и другие значительные упущения, которые также оказывают негативное влияние на достоверность определения сопротивления сваи. Так, в формулах, учитывающих вязкое сопротивление грунта, ее параметры, назначаются в виде постоянных величин, независимо от скорости движения сваи при ударе молота [11,32]. Такой подход противоречит эмпирическому закону вязкого трения, принятому в классической механике [44] и снижает точность расчетов по рассматриваемым формулам.

Касаясь сопротивления грунта при ударе, важно отметить, что в зависимости от энергии удара при одинаковых условиях забивки сваи, оно, в общем виде, может проявляться в виде упругого, упругопластического, и пластического сопротивления. При упругом сопротивлении грунта имеют место упругие деформации. При упругопластическом сопротивлении проявляются как упругие, так и пластические деформации грунта, а при пластическом сопротивлении – только пластические. Несомненно, проявление того или иного вида деформирования (сопротивления) грунта при ударе, непосредственно связано с энергетическими затратами молота. Следовательно, характер динамического деформирования грунта нуждается в учете при определении сопротивления сваи. Данный фактор, к сожалению, в настоящее время, остается без внимания со стороны специалистов.

Принципиально важным упущением при выводе большинства существующих формул, в том числе и формулы Н.М. Герсеванова, входящей в состав свода правил [32], является то, что авторы допускали, что сопротивление сваи, определяемое из уравнения энергетического баланса, соответствует его сопротивлению при действии статической вдавливающей нагрузки. Таким образом, имело и имеет место до сих пор подмена динамического сопротивления сваи статическим сопротивлением. Такой подход, не вполне соответствует, фактической картине поведения грунта при забивке сваи. Доказательством этому служат исследования, выполненные

Б.В. Бахолдиным и его учениками [7-11], в результате которых было установлено, что статическое сопротивление сваи, особенно в глинистых грунтах, не идентично, динамическому сопротивлению сваи. Исходя из этого, были получены формулы, которые позволяют статическое сопротивление сваи, определять с учетом вязкого сопротивления грунта (динамической составляющей сопротивления грунта). К этой группе формул относится и формула Б.В. Бахолдина, входящая в состав свода правил [32]. Но, если вопрос учета характера динамического поведения грунта при забивке сваи, к настоящему времени, в то или иной мере решен положительно, то подобного нельзя утверждать в отношении учета особенностей динамического сопротивления сжатию других (кроме грунта) ударяющихся элементов системы «молот-свая-грунт».

В целом, наличие недостатков в динамических формулах, а также упущений, допущенных при их выводе, свидетельствует об актуальности дальнейшего совершенствования динамического метода оценки сопротивления свай.

Актуальность модернизации существующего динамического метода особо важна также и для комбинированного свайного фундамента, в котором ростверк, устраивается в котловане, выштампованном в околовсвайном грунте [45]. Устройство такого фундамента включает в себя как забивку сваи, так и забивку поверху нее полого штампа для выштамповывания котлована в околовсвайном грунте. Поэтому процесс устройства комбинированного свайного фундамента является более сложным процессом, чем процесс забивки одиночной сваи. Несомненно, эти особенности требуют своего учета как при установлении порядка проведения динамических испытаний, так и при оценке несущей способности сваи и ростверка по результатам этих испытаний.

Материалы и методы исследований. В настоящей работе пути модернизации метода рассматриваются применительно к определению сопротивления комбинированного односвайного фундамента, включающего в себя забивку сваи и устройство ростверка в локальном котловане, выштампованного в околовсвайном грунте, после забивки сваи [45]. Динамические испытания комбинированного свайного фундамента включают в себя следующие технологические операции (рис. 1) [46]:

- 1) Забивку сваи 1 молотом 2;
- 2) Установку стального штампа 3 (со сквозным отверстием в центре для пропуска головной части сваи) поверху сваи на поверхность грунта;
- 3) Забивку штампа (выштамповывание котлована);
- 4) Подъем съемной верхней части штампа 4;
- 5) Добивку сваи по требуемой глубины при помощи стальной стойки 5 с амортизатором 6 в нижней части;
- 6) Подъем нижней части штампа 7 (извлечение штампа из котлована 8);
- 7) Укладку амортизатора 6 на торцовую поверхность (на голову) сваи;
- 8) Установку полого стального шаблона 9 (с упорным выступом 10 и стойкой 11), поверху головы сваи;
- 9) Размещение стойки шаблона 10 в наголовнике молота;
- 10) Сжатие шаблона штампа весом молота для обеспечения плотного контакта днища и боковой поверхности шаблона с грунтом котлована, а также для достижения подобного контакта дна упорного выступа шаблона с амортизатором и торцом сваи;

11) Нанесение удара (ударов) молотом по стойке шаблона с измерением полного и упругого отказов шаблона штампа и сваи, а также скорости или продолжительности их перемещений при ударе (ударах).

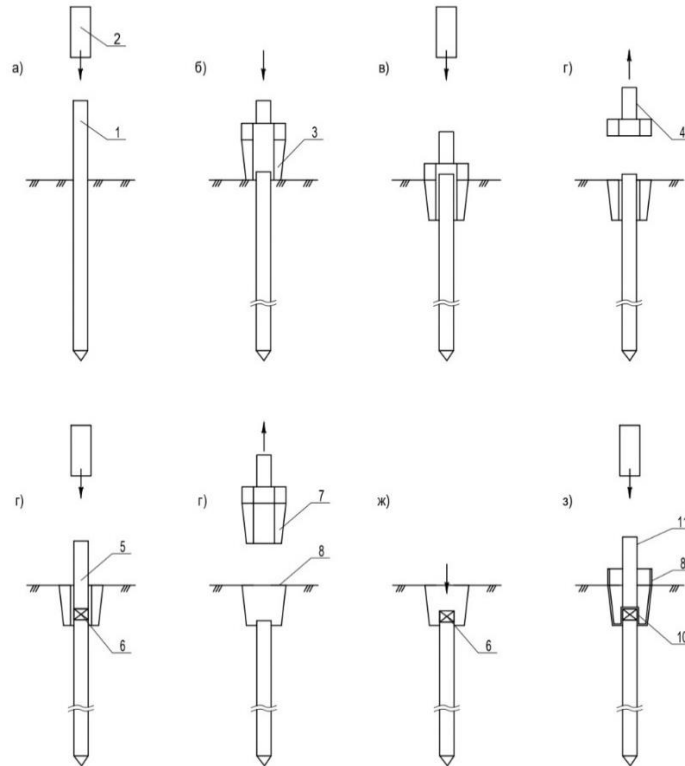


Рис. 1. Технологическая схема проведения динамических испытаний

Для составления исходных уравнений энергетического баланса взаимодействия элементов системы «молот-шаблон-штамп-свая-грунт» при ударе молота, приняты соответствующие исходные предпосылки. Предпосылки составлены применительно к условиям устройства комбинированного свайного фундамента с применением дизельных молотов. К ним относятся:

1) Полная энергия молота включает в себя механическую часть энергии удара и энергию взрыва горючей смеси в камере сгорания молота при ударе, которая зависит от расхода (объема) топлива;

2) При ударе часть энергии молота затрачивается на сжатие ударяющихся элементов (шабота молота, элементов наголовника, амортизатора в нем, стойки шаблона, амортизатора в упорном выступе шаблона и сваи);

3) При ударном сжатии в ударяющихся элементах системы (кроме грунта) проявляются только упругие деформации;

4) Упругие деформации ударяющихся элементов системы вызваны динамическими (ударными) нагрузками (усилиями), которые превышают соответствующие статические нагрузки (усилия);

5) Масса молота (без учета массы ударной части молота), шабота, наголовника и амортизатора в нем, а также масса сваи, стального шаблона

штампа и амортизатора в упорном выступе шаблона, до удара приложены к грунту в виде статической нагрузки;

6) При ударе элементы системы, указанные в позиции 5, перемещаются вниз на величину полного отказа сваи и шаблона штампа, что сопровождается затратами энергии удара молота;

7) Часть энергии удара молота затрачивается на работу по преодолению силы динамического сопротивления грунта, а также на формирование силы его упругого динамического отпора в конце удара;

8) Динамическое сопротивление комбинированного свайного фундамента (сваи и шаблона штампа) в глинистых грунтах состоит из статической составляющей и вязкого сопротивления, зависящего от скорости совместного движения сваи и шаблона штампа при ударе, а в песчаных грунтах – из статической составляющей, не зависящей от скорости движения сваи и шаблона штампа;

9) Динамическое сопротивление комбинированного свайного фундамента при ударе молота зависит от характера деформирования грунта при совместном внедрении в него сваи и шаблона штампа;

10) Сила упругого динамического отпора грунта, затрачивается на работу по подъему ударяющихся элементов на величину упругого отказа сваи и шаблона, а также на подскок ударной части молота в конце ударного контакта;

11) Часть энергии удара возвращается молоту в виде работы силы упругого динамического отпора грунта по подъему ударяющихся элементов на величину упругого отказа сваи и шаблона, а также в виде работы по обеспечению подскока ударной части молота в конце удара;

12) Подскок ударной части молота в конце удара по свае имеет место при механическом ударе, а при ударе работающим молотом (например, при ударе дизельного молота с подачей топлива в камеру его сгорания), подскок как физическое явление не проявляется. В этом случае сила упругого динамического отпора грунта, полностью затрачивается на подъем ударяющихся элементов системы вверх.

Результаты исследований. Уравнения энергетического баланса и определение динамического сопротивления грунта, внедрению шаблона штампа и сваи.

Исходя из принятых предпосылок, составлены следующие два уравнения энергетического баланса, для процесса ударного взаимодействия элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт»:

$$E_d - (A_{oэ} + A_{op}) = (E_{сэ} + E_{pэ}) + E_{dg}, \quad (1)$$

$$E_d - A_{oэ} = (E_{сэ} + E_{pэ}) + E_{dg}, \quad (2)$$

где: E_d – полная энергия удара молота; $A_{oэ}$ – работа силы упругого динамического отпора грунта по подъему ударяющихся элементов на величину упругого отказа сваи и шаблона штампа; A_{op} – работа силы упругого динамического отпора грунта по обеспечению подскока ударной части молота; $E_{сэ}$ – энергия удара молота, которая затрачивается на упругое сжатие ударяющихся элементов системы; $E_{pэ}$ – энергия удара молота, которая затрачивается на перемещение ударяющихся элементов системы

вниз на величину полного отказа сваи и шаблона штампа; E_{dg} – энергия молота, затрачиваемая по преодолению динамического сопротивления грунта.

Уравнение (1) приемлемо для случая, когда удар молота по свае, наносится отключенным молотом, в виде механического удара. Например, к такому удару относится удар дизельного молота без подачи топлива в камеру его сгорания. Уравнение (2), в свою очередь, приемлемо для случая, когда удар молота по свае осуществляется работающим дизельным молотом с подачей топлива в камеру его сгорания.

Рассмотрим пути определения параметров, входящих в уравнения (1) и (2). Полную энергию удара дизельного молота E_d в уравнении (1) рекомендуется определять по формуле (3), а в уравнении (2) – по формуле (4):

$$E_d = (E_{mp} - E_{sk}) = GHk - AH_p P_u, \quad (3)$$

$$E_d = (E_{mp} + E_{tp} - E_{sk}) = GHk + \left[\frac{Ak_B V_{tB}}{(n-1)} \right] x \left\{ 1 - \left[\frac{B}{(B+k_s S_n)} \right]^{n-1} \right\} - AH_p P_u, \quad (4)$$

где: E_{mp} – энергия механического удара молота; E_{tp} – энергия взрыва горючей смеси в камере сгорания молота, идущая на погружение сваи; E_{sk} – энергия удара молота, расходуемая на сжатие воздуха в его камере сгорания; G – вес ударной части молота; H – высота падения ударной части молота; S_n – полный отказ сваи и шаблона штампа.

Все остальные обозначения параметров, принятые в формулах (3) и (4), соответствуют обозначениям, принятым в работах [38,39]. Формула (4) в отличие от существующих формул, представленных в работах [35-37] позволяет производить расчет полной энергии удара молота с учетом расхода топлива в его камере сгорания и всех других влияющих факторов.

Работа силы упругого динамического отпора грунта по подъему соударяющихся элементов $A_{оэ}$ определяется по формуле (5)

$$A_{оэ} = (Q_m + q_{shm} + q_n + q_{an} + q_{sh} + q_{auv} + q_c + F_{mt}) S_u = (Q + F_{mt}) S_u, \quad (5)$$

$$F_{mt} = \mu Q_m, \quad (6)$$

где: Q_m – вес молота; q_{shm} – вес шабота; q_n – вес наголовника; q_{an} – вес амортизатора в наголовнике; q_{sh} – вес шаблона штампа; q_{auv} – вес амортизатора в упорном выступе шаблона; q_c – вес сваи; F_{mt} – сила трения между элементами корпуса молота и направляющей стрелы копровой установки; S_u – упругий отказ сваи и шаблона штампа; μ – коэффициент трения; Q – суммарный вес элементов системы.

Работа силы упругого динамического отпора грунта по обеспечению подскока ударной части молота $A_{оп}$ устанавливается по следующей формуле:

$$A_{оп} = Gh, \quad (7)$$

где: h – высота подскока ударной части молота.

Энергия удара молота, которая затрачивается на упругое сжатие ударяющихся элементов системы E_{s3} , определяется по формуле:

$$E_{s3} = (P_{shm}^d \Delta_{shm}^d + P_n^d \Delta_n^d + P_{an}^d \Delta_{an}^d + P_{csh}^d \Delta_{csh}^d + P_{auv}^d \Delta_{auv}^d + P_c^d \Delta_c^d), \quad (8)$$

где: P_{shm}^d , P_n^d , P_{an}^d , P_{csh}^d , P_{auv}^d и P_c^d – динамическая нагрузка на шабот молота, наголовник, амортизатор в нем, стойку шаблона штампа, амортизатор в упорном выступе шаблона и сваю; Δ_{shm}^d , Δ_n^d , Δ_{an}^d , Δ_{csh}^d , Δ_{auv}^d и Δ_c^d – динамическая деформация шабота молота, днища наголовника, амортизатора в нем, стойки шаблона штампа, амортизатора в упорном выступе шаблона и сваи.

Энергия удара молота, которая затрачивается на перемещение соударяющихся элементов системы, E_{p3} устанавливается по формуле:

$$E_{p3} = (Q_m + q_{shm} + q_n + q_{an} + q_{sh} + q_{auv} + q_c + F_{mt})S_n = (Q + F_{mt})S_n, \quad (9)$$

Энергия удара молота, затрачиваемая по преодолению динамического сопротивления грунта, E_{dg} определяется по формуле:

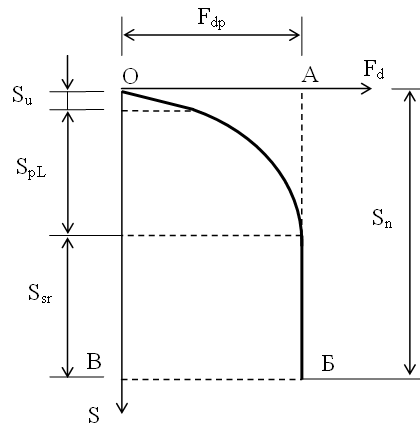
$$E_{dg} = A_{dg} = k_p F_d S_n, \quad (10)$$

где: A_{dg} – работа молота по преодолению силы динамического сопротивления грунта F_d ; k_p – коэффициент, определяющий долю работы A_{dg} от идеализированной работы, равной произведению $F_d S_n$ (рис. 2).

Коэффициент k_p в формуле (10) теоретически может иметь значения от 0,5 до 1,0. При значениях коэффициента $k_p = 0,5$ при ударе молота будет проявляться только упругое сопротивление грунта, а при значении коэффициента $k_p = 1,0$ (и близких к 1,0) – вязкопластическое сопротивление глинистого грунта или пластическое сопротивление песчаного грунта с достижением их предельных состояний. При промежуточных значениях коэффициента k_p будет иметь место упруго-вязкопластическое сопротивление глинистого грунта или упругопластическое сопротивление песчаного грунта.

Как видно, данный коэффициент является показателем, отражающим характер деформирования грунта при погружении сваи и шаблона штампа, и по величине которого можно судить о достижении или же не достижении грунтом предельного состояния (проявлении или же не проявлении предельного сопротивления грунта). Следовательно, от этого параметра зависит достоверность определения энергии удара молота E_{dg} по формуле (10).

Значения коэффициента k_p можно назначать на основе графика зависимости $F_d = f(S)$ в виде отношения площади фигуры ОБВ к площади прямоугольника ОАБВ (см. рис. 2).



F_{dp} - динамическое предельное сопротивление грунта; S_n - полное перемещение (отказ) сваи и шаблона штампа; S_u - упругое перемещение; S_{pL} - вязкопластическое перемещение; S_{sr} - пластическое перемещение (деформация «срыва»).

Рис. 2. Изменение силы динамического сопротивления грунта F_d по мере увеличения перемещения сваи S при ударе молота

К сожалению, график зависимости $F_d = f(S)$ можно построить лишь на основе результатов испытаний тензометрических свай, что сложно реализуемо технически. Поэтому определять значения коэффициента на основе указанного графика не всегда возможно. Сопротивление сваи и шаблона штампа при ударе молота будет всегда больше, чем сопротивление самой отдельной сваи, поэтому можно вполне допускать, что в глинистом грунте, в основном, будет проявляться упруго-вязкопластическое сопротивление, а в песчаном грунте - упругопластическое сопротивление, без проявления деформаций «срыва». Исходя из этого, коэффициент k_p в формуле (10) следует ориентировочно принимать в пределах от 0,6 до 0,8.

Учитывая формулы (5)–(7), (9) и (10) уравнения (1) и (2) можно представить в виде:

$$E_d - [(Q + \mu Q_m)S_u + Gh] = E_{s3} + (Q + \mu Q_m)S_n + k_p F_d S_n, \quad (11)$$

$$E_d - (Q + \mu Q_m)S_u = E_{s3} + (Q + \mu Q_m)S_n + k_p F_d S_n, \quad (12)$$

Из представленных уравнений можно получить следующие формулы по определению динамического сопротивления грунта, внедрению шаблона штампа и сваи, при ударе:

$$F_d = \{E_d - [(Q + \mu Q_m) \cdot (S_u + S_n)] - (Gh + E_{s3})\} / k_p S_n, \quad (13)$$

$$F_d = \{E_d - [(Q + \mu Q_m) \cdot (S_u + S_n)] - E_{s3}\} / k_p S_n, \quad (14)$$

Определение статического сопротивления сваи и ростверка, устроенного в выштампованном котловане. Для определения вязкого сопротивления грунта, предположим, что закономерности его изменения при

забивке штампа, аналогичны тем, которые имеют место при забивке сваи. Это обусловлено тем, что особенности вязкого сопротивления грунта при погружении штампа ударами молота на современном этапе еще не изучены и не могут быть представлены в виде конкретных закономерностей.

Принимаем, что как при забивке сваи, так и при выштамповывании котлована, в грунте проявляются вязкие свойства, которые зависят от скорости перемещения сваи и штампа при ударах молота. Исходя из этого, статическое сопротивление сваи и ростверка F_c можно установить, как разницу между динамическим сопротивлением F_d и вязким сопротивлением F_v грунта по следующей формуле:

$$F_c = F_d - F_v, \quad (15)$$

В работах [12,13] Бекбасаровым И.И. представлены уточненные корреляционные зависимости между параметрами вязкого и статического сопротивления грунта. Данные зависимости получены автором на основе детальной обработки результатов экспериментальных исследований, представленных в работах [7,8]. С учетом этих зависимостей формулу по определению вязкого сопротивления грунта F_v можно представить в виде:

$$F_v = [(A_{osh}\eta_{osh} + A_{os}\eta_{os}) + (A_{bsh}\eta_{bsh} + A_{bs}\eta_{bs})]v \quad (16)$$

где: A_{osh} - площадь подошвы шаблона штампа; η_{osh} - удельное вязкое сопротивление грунта под подошвой шаблона штампа; A_{os} - площадь нижнего конца сваи; η_{os} - удельное вязкое сопротивление грунта под нижним концом сваи; A_{bsh} - площадь боковой поверхности шаблона штампа; η_{bsh} - удельное вязкое сопротивление грунта по боковой поверхности шаблона штампа; A_{bs} - площадь боковой поверхности сваи; η_{bs} - удельное вязкое сопротивление грунта по боковой поверхности сваи.

С учетом формулы (16) формулу (15) можно представить в следующем виде:

$$F_c = F_d - [(A_{osh}\eta_{osh} + A_{os}\eta_{os}) + (A_{bsh}\eta_{bsh} + A_{bs}\eta_{bs})]v, \quad (17)$$

В формуле (17) параметры η_{osh} , η_{os} , η_{bsh} и η_{bs} относятся к единичной скорости перемещения шаблона штампа и сваи от ударов молота. Рассмотрим пути определения этих параметров.

Формулу по определению удельного вязкого сопротивления грунта η_{os} под нижним концом сваи можно записать в виде следующего выражения [13]:

$$\eta_{os} = u(r_{os}^s)^2 - jr_{os}^s, \quad (18)$$

где: u и j - коэффициенты, соответственно равные: 0,001 сек/кН·м; 0,0102 сек/м; r_{os}^s - удельное статическое сопротивление грунта под нижним концом сваи.

В формуле (18) удельное статическое сопротивление грунта r_{os}^s можно принимать равным расчетному сопротивлению грунта под нижним концом сваи, которое определяется в соответствии с требованиями свода правил [32] или по формулам, представленным в работе [47].

Допуская, что зависимость (18) подобна и для грунта, залегающего под подошвой шаблона штампа, для определения удельного вязкого сопротивления η_{osh} можно записать следующую формулу:

$$\eta_{osh} = y(r_{osh}^s)^2 - jr_{osh}^s, \quad (19)$$

где: r_{osh}^s – удельное статическое сопротивление грунта под подошвой шаблона штампа.

В формуле (19) удельное статическое сопротивление грунта r_{osh}^s под подошвой шаблона штампа можно принимать равным расчетному сопротивлению уплотненного грунта основания в соответствии с требованиями свода правил [48].

Удельное вязкое сопротивление грунта η_{bs} по боковой поверхности сваи можно определять по следующей формуле [13]:

$$\eta_{bs} = w(r_{bs}^s)^3 - q(r_{bs}^s)^2 + br_{bs}^s, \quad (20)$$

где: w, q и b – коэффициенты, соответственно равные: $6,0 \times 10^{-6}$ сек/кН; $0,001138$ сек/кН·м; $2,438$ сек/м; r_{bs}^s – удельное статическое сопротивление грунта по боковой поверхности сваи.

В формуле (20) удельное статическое сопротивление грунта r_{bs}^s рекомендуется устанавливать по следующей формуле:

$$r_{bs}^s = (\sum_{i=0}^n f_i) / n \quad (21)$$

где: n – количество слоев грунтовой толщи, залегающих в пределах глубины L_{ns} ; L_{ns} – глубина расположения нижнего конца сваи от поверхности выштамповывания котлована; f_i – расчетное сопротивление грунта i – того слоя, залегающего вдоль боковой поверхности шаблона штампа и сваи (в пределах глубины L_{ns}), определяемое в соответствии с требованиями свода правил [32] или по формулам, представленным в работе [47].

Допуская, что зависимость (21) подобна и для грунта, залегающего по боковой поверхности шаблона штампа, для определения удельного сопротивления η_{bsh} можно записать следующую формулу:

$$\eta_{bsh} = w(r_{bsh}^s)^3 - q(r_{bsh}^s)^2 + br_{bsh}^s, \quad (22)$$

где: r_{bsp}^s – удельное статическое сопротивление грунта по боковой поверхности шаблона штампа.

В формуле (21) удельное статическое сопротивление грунта r_{bsp}^s по боковой поверхности шаблона штампа рекомендуется принимать равным сопротивлению грунта по боковой поверхности, определяемому в соответствии с требованиями свода правил [32] как для забивной пирамидальной сваи.

Скорость перемещения шаблона штампа и сваи v при ударе молота в формуле (17) предлагается определять по следующей формуле:

$$v = S_n / t_u, \quad (23)$$

где: t_u – продолжительность перемещения шаблона штампа и сваи при ударе молота, сек.

Продолжительность перемещения сваи при ударе молота t_u устанавливается путем ее измерения в процессе проведения динамических испытаний. При наличии технической возможности целесообразно устанавливать скорость перемещения шаблона штампа и сваи v без измерения временного параметра t_u .

Определение динамических параметров, характеризующих процесс удара молота по шаблону штампа и свае.

Динамические параметры ударяющихся элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт», входящие в состав формулы (8) можно определять через их соответствующие статические параметры. Такой подход используется в теории удара двух твердых тел [49]. В этом случае нагрузки, напряжения и деформации при ударе, устанавливаются в виде произведения их статических величин и значений коэффициента динамичности. Учитывая данное обстоятельство, применительно к рассматриваемой системе, можно предложить формулы (24)–(29) по определению динамических нагрузок, имеющих место при ударе:

$$P_{shm}^d = k_{shm}^p P_{shm}^c = k_{shm}^p (G + Q_m), \quad (24)$$

$$P_n^d = k_n^p P_n^c = k_n^p (G + Q_m + q_{shm}), \quad (25)$$

$$P_{an}^d = k_{an}^p P_{an}^c = k_{an}^p (G + Q_m + q_{shm} + q_n), \quad (26)$$

$$P_{csh}^d = k_{csh}^p P_{csh}^c = k_{csh}^p (G + Q_m + q_{shm} + q_n + q_{an}), \quad (27)$$

$$P_{auv}^d = k_{auv}^p P_{auv}^c = k_{auv}^p (G + Q_m + q_{shm} + q_n + q_{an} + q_{sh}), \quad (28)$$

$$P_c^d = k_c^p P_c^c = k_c^p (G + Q_m + q_{shm} + q_n + q_{an} + q_{sh} + q_{auv}), \quad (29)$$

где: P_{shm}^c , P_n^c , P_{an}^c , P_{csh}^c , P_{auv}^c и P_c^c – статическая нагрузка на шаблот молота, наголовник, амортизатор в нем, стойку шаблона штампа, амортизатор в упорном выступе шаблона и сваю; k_{shm}^p , k_n^p , k_{an}^p , k_{csh}^p , k_{auv}^p и k_c^p – коэффициент динамичности по нагрузке для шаблота молота, наголовника, амортизатора в нем, стойки шаблона штампа, амортизатора в упорном выступе шаблона и сваи.

Аналогично можно записать формулы для определения динамических упругих деформаций ударяющихся элементов системы

$$\Delta_{shm}^d = k_{shm}^\Delta \Delta_{shm}^c = k_{shm}^\Delta [(P_{shm}^c t_{shm}) / A_{shm} E_{shm}^c], \quad (30)$$

$$\Delta_n^d = k_n^\Delta \Delta_n^c = k_n^\Delta [(P_n^c t_n) / A_n E_n^c], \quad (31)$$

$$\Delta_{an}^d = k_{an}^\Delta \Delta_{an}^c = k_{an}^\Delta [(P_{an}^c t_{an}) / A_{an} E_{an}^c], \quad (32)$$

$$\Delta_{csh}^d = k_{csh}^\Delta \Delta_{csh}^c = k_{csh}^\Delta [(P_{csh}^c h_{csh}) / A_{csh} E_{csh}^c], \quad (33)$$

$$\Delta_{auv}^d = k_{auv}^\Delta \Delta_{auv}^c = k_{auv}^\Delta [(P_{auv}^c t_{auv}) / A_{auv} E_{auv}^c], \quad (34)$$

$$\Delta_c^d = k_c^\Delta \Delta_c^c = k_c^\Delta [(P_c^c L_c) / A_{os} E_c^c], \quad (35)$$

где: Δ_{shm}^c , Δ_n^c , Δ_{an}^c , Δ_{csh}^c , Δ_{auv}^c и Δ_c^c – статическая упругая деформация шабота молота, днища наголовника, амортизатора в нем, стойки шаблона штампа, амортизатора в упорном выступе шаблона и сваи; k_{shm}^Δ , k_n^Δ , k_{an}^Δ , k_{csh}^Δ , k_{auv}^Δ и k_c^Δ – коэффициент динамичности по деформации для шабота молота, наголовника, амортизатора в нем, стойки шаблона штампа, амортизатора в упорном выступе шаблона и сваи; A_{shm} , A_n , A_{an} , A_{csh} , A_{auv} и A_{os} – площадь сечения ударяющихся элементов; t_{shm} , t_n , t_{an} , h_{csh} , t_{auv} и L_c – толщина шабота, днища наголовника, амортизатора в нем, высота стойки шаблона штампа, толщина амортизатора в упорном выступе шаблона и длина сваи; E_{shm}^c , E_n^c , E_{an}^c , E_{csh}^c , E_{auv}^c и E_c^c – статический модуль упругости материалов ударяющихся элементов.

Определение коэффициентов динамичности. Рассмотрим пути определения коэффициентов динамичности, входящих в состав формул (24)–(35). В настоящее время существует ряд формул, предназначенных для расчета коэффициентов динамичности. Ниже приведен их краткий анализ.

Соляник-Красса К.В. в работе [50] излагает основные положения приближенной теории удара твердого тела по неподвижному телу. Рассматривается упругий удар, при котором процесс деформирования ударяемого тела подчиняется закону Гука, и статический модуль упругости равен динамическому. Динамическое напряжение σ_d и динамическую упругую деформацию δ_d ударяемого тела предлагается устанавливать соответственно по формулам (36) и (37), а коэффициент динамичности k – по формуле (38).

$$\sigma_d = k \sigma_{ст}, \quad (36)$$

$$\delta_d = k \delta_{ст}, \quad (37)$$

$$k = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\delta_{ст}}\right) \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{3}\right) \chi \right] / \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right) \chi \right]^2 \right\}}, \quad (38)$$

$$\chi = Q/P, \quad (39)$$

где: h – высота падения ударяющего тела; Q – вес ударяемого тела; P – вес ударяющего тела.

Снитко Н.К. в работе [51] для определения амплитуды колебания сваи при забивке по формуле (40), коэффициент динамичности $\mu_{дин}$, именуемый динамическим коэффициентом, рекомендует устанавливать по формуле (41).

$$A = \Delta_{ст} \mu_{дин}, \quad (40)$$

$$\mu_{дин} = \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\Delta_{ст}}\right) \cdot \left[\frac{M}{(M+m_{пр})} \right]} \right\}, \quad (41)$$

где: A – амплитуда колебания сваи при ударе молота по свае; h – высота падения молота; M – масса молота; $m_{пр}$ – приведенная масса сваи; $\Delta_{ст}$ – статическое перемещение сваи от веса молота.

Формула (41) выведена автором на основе положений теории жесткого удара по приведенной массе сваи, которая предварительно получена из частного уравнения собственных продольных колебаний сваи.

В работе [52] коэффициент динамичности k_d при ударе груза по неподвижному стержню предложено рассчитывать по формуле (42). При этом деформации стержня и напряжения в нем при ударе груза определяются соответственно по формулам (43) и (44).

$$k_d = [1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\Delta l_{st}}\right)}], \quad (42)$$

$$\Delta l_d = k_d \Delta l_{st}, \quad (43)$$

$$\sigma_d = k_d \sigma_{st}, \quad (44)$$

где: Δl_d – динамическая упругая деформация стержня при ударе груза; Δl_{st} – статическая упругая деформация стержня от веса груза; σ_d – динамическое напряжение в стержне при ударе груза; σ_{st} – статическое напряжение в стержне от веса груза.

Формула (42) получена на основе закона сохранения механической энергии, а также с учетом ряда допущений, в том числе, таких как отсутствие отскока груза от стержня после удара и деформирование стержня при ударе в соответствии с законом Гука.

Манжосов В.К. в работе [53] для определения коэффициента динамичности предлагает использовать формулу, аналогичную формуле (41). При выполнении условия, когда отношение $2h/\Delta_{ст}$ больше 10^4 автор рекомендует применять упрощенный вариант формулы (42) в виде формулы (45).

Формула (44) приемлема для условий удара твердого тела по стержню без учета распределенных инерционных сил. При этом, ударная нагрузка, приходящая на стержень и динамическое напряжение в нем при ударе устанавливаются соответственно по формулам (46) и (47).

$$k_d = \sqrt{\left(\frac{2h}{\Delta_{ст}}\right)}, \quad (45)$$

$$P_d = k_d P_{ст}, \quad (46)$$

$$\sigma_d = k_d \sigma_{ст}, \quad (47)$$

где: P_d – ударная нагрузка на стержень; $P_{ст}$ – статическая нагрузка на стержень от веса ударяющего тела.

При ударе твердого тела по стержню, масса которого условно приведена к массе сосредоточенного тела в точке удара, Манжосов В.К. для расчета коэффициента динамичности рекомендует применять следующую формулу [53]:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{\Delta_{ст} \left(1 + \frac{m_n}{M}\right)}\right)}, \quad (48)$$

где: m_n – приведенная масса стержня; M – масса ударяющего тела.

Анализ теоретических основ представленных формул позволяет выявить их следующие особенности:

- рассматривается удар двух упругих тел, без учета подскока ударяющего тела после удара;
- процесс динамического деформирования материала ударяемого тела подчиняется закону Гука;
- статический модуль упругости материала ударяемого тела принимается равным его динамическому модулю упругости;
- коэффициент динамичности всегда больше 1,0, и его значение постоянно, как для ударной нагрузки, так и для динамических напряжений и деформаций ударяемого тела;
- ударная нагрузка, динамические напряжения и деформации ударяемого тела больше, чем его соответствующие статические параметры.

Перечисленное свидетельствует о том, что формулы (38), (41), (42), (45) и (48) не в полной мере учитывают особенности процесса ударного взаимодействия элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт» и поэтому не могут быть использованы для определения коэффициентов динамичности, входящих в состав формул (24)–(35). Дополнительно к этому следует добавить, что коэффициенты динамичности, при выводе существующих формул, специалистами устанавливались в виде условной совокупности нескольких параметров, принимаемой с целью упрощения математических действий. Поэтому из-за такого некорректного подхода содержание некоторых формул противоречит физическим представлениям об ударном процессе. Так, например если рассматривать формулу (46) во взаимосвязи с формулой (45), то, видно, что ударная нагрузка, прикладываемая к стержню, зависит от статической деформации стержня, которая имеет место при приложении к ней статической нагрузки (от веса ударяющего тела). Физически такая зависимость не реальна, так как величина ударной нагрузки (перед ударом) может зависеть только от массы ударяющего тела и скорости его движения (ускорения). Если при определении ударной нагрузки по формуле (46), коэффициент динамичности устанавливать по формуле (48), то видно, что величина ударной нагрузки (перед ударом), кроме статической деформации стержня, зависит также от ее приведенной массы, что тоже физически неприемлемо.

Другим парадоксальным фактом является следующее обстоятельство. Так, из формулы (43), при определении коэффициента динамичности соответственно по формуле (42), следует, что динамическая деформация стержня больше ее статической деформации (от веса ударяющего груза). Аналогичное имеет место и при соответствующем использовании формул (37) и (38). Если рассматривать стержни, изготавливаемые из бетона, то данный факт противоречит результатам исследований Баженова Ю.М. [52], которые свидетельствуют о том, что при динамическом нагружении, деформации бетона всегда меньше, чем его статические деформации.

Исходя из изложенных доводов, нами предложен иной подход к определению коэффициента динамичности. Сущность этого подхода состоит в том, что данный коэффициент, устанавливается в виде отношения динамического параметра к статическому параметру, что соответствует его предназначению. При этом, предварительно принимаем, что характер зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ (где: σ – сжимающее напряжение; ε – относительная деформация сжатия) как при ударе, так и при статическом приложении

нагрузки (в упругой стадии работы материала) не изменяется, а различия состоят только в значениях σ и ε . Эти количественные отличия определяются разностью модулей упругости материалов тел при статическом и динамическом воздействиях. Такие особенности напряженно-деформированного состояния характерны для бетона (рис. 3) [54].

Принятые постулаты, с большой степенью вероятности, можно распространять и на другие ударяющиеся элементы системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт», которые изготавливаются из небетонных материалов (стали, древесины, резины и др.).

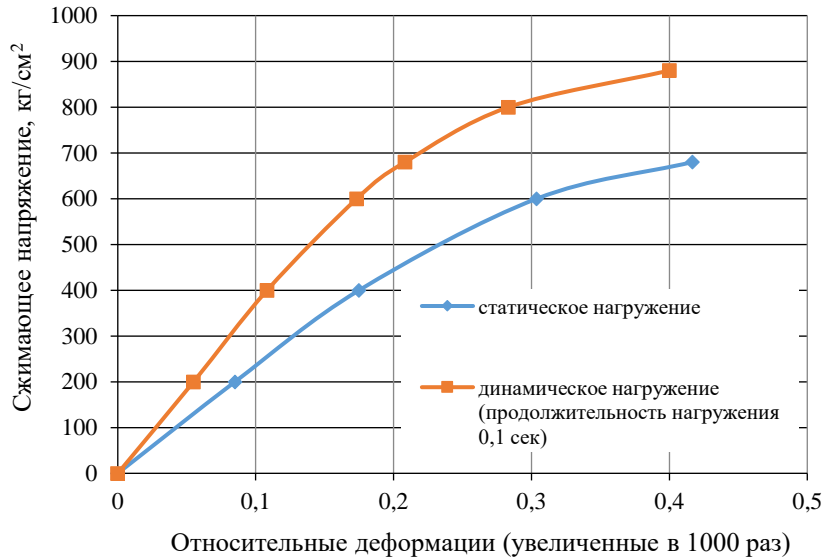


Рис. 3. Зависимость сжимающих напряжений от относительных деформаций бетона [54]

Таким образом, формулу по определению коэффициента динамичности по нагрузке k^p можно представить в виде следующего отношения:

$$k^p = \frac{P^d}{P^c} = \frac{\sigma^d A^d}{\sigma^c A^c} = \frac{E^d \varepsilon^d A^d}{E^c \varepsilon^c A^c}, \quad (49)$$

где: P^d – ударная нагрузка; P^c – статическая нагрузка; σ^d – динамическое напряжение; σ^c – статическое напряжение; A^d – площадь передачи ударной нагрузки; A^c – площадь передачи статической нагрузки; E^d – динамический модуль упругости; E^c – статический модуль упругости; ε^d – относительная динамическая деформация; ε^c – относительная статическая деформация.

Как известно, традиционно, в научных исследованиях, оценка эффекта от действия одного фактора (на изучаемый элемент) осуществляется при условии постоянства других влияющих факторов. Использование этого научного принципа, позволяет эффект превышения ударной нагрузки над статической нагрузкой оценивать при выполнении равенств: $A^d = A^c$ и $\varepsilon^d = \varepsilon^c$. С учетом этого формула (48) может быть окончательно представлена в виде:

$$k^p = \frac{E^d}{E^c}, \quad (50)$$

Таким образом, эффект превышения ударной нагрузки над статической нагрузкой при одинаковых всех других влияющих факторах, соответствует эффекту превышения динамического модуля упругости над статическим модулем. Именно этим можно объяснить различие в значениях параметров σ и ε бетона при его статическом и динамическом нагружениях (см. рис. 3).

Пользуясь вышеуказанным принципом, при условии $A^d = A^c$, можно установить, что коэффициент динамичности по напряжению равен коэффициенту динамичности по нагрузке.

$$k^\sigma = \frac{\sigma^d}{\sigma^c} = \frac{P^d A^c}{P^c A^d} = \frac{P^d}{P^c} = k^P, \quad (51)$$

Формулу по определению коэффициента динамичности по деформации k^Δ можно представить в следующем виде:

$$k^\Delta = \frac{\Delta^d}{\Delta^c} = \frac{\sigma^d l^d E^c}{\sigma^c l^c E^d}, \quad (52)$$

где: Δ^d – динамическая деформация; Δ^c – статическая деформация; l^d – толщина элемента при ударе; l^c – толщина элемента при статической нагрузке.

Эффект превышения динамической деформации над статической деформацией оценивается при соблюдении равенств $\sigma^d = \sigma^c$ и $l^d = l^c$. При этом формула (52) может быть окончательно преобразована в следующее выражение:

$$k^\Delta = \frac{E^c}{E^d} = 1/k^P, \quad (53)$$

Из формул (50) и (51) следует, что коэффициенты динамичности по нагрузке и по напряжению больше 1,0, а из формулы (53) следует, что коэффициент динамичности по деформациям наоборот меньше 1,0. Для количественной проверки этих положений применительно к бетону выполнены соответствующие вычисления на основе экспериментальных данных, представленных в работе [54] (см. рис. 3). Результаты расчетов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Значения относительных деформаций бетона и коэффициента динамичности по деформации k^Δ

Напряжение в бетоне, кг/см ² ($\sigma^d = \sigma^c$)	Относительная деформация		Коэффициент динамичности по деформации k^Δ
	динамическая, ε^d	статическая, ε^c	
200	0,0550	0,0850	0,667
400	0,1083	0,175	0,619
600	0,1733	0,3083	0,562
667	0,2083	0,4167	0,499
800	0,2833	-	-
867	0,4000	-	-

Таблица 3

Значения напряжений в бетоне и коэффициента динамичности по напряжению k^σ

Уровень относительных деформаций бетона ($\varepsilon^d = \varepsilon^c$)	Напряжение в бетоне, кг/см ² ,		Коэффициент динамичности по напряжению k^σ
	динамическое, σ^d	статическое, σ^c	
0,1	400,00	266,67	1,499
0,2	683,33	483,33	1,414
0,3	816,67	616,67	1,324
0,4	866,67	666,67	1,299

Из таблиц видно, что значения коэффициента динамичности по деформации меньше 1,0 и составляют 0,499-0,667, а значения коэффициента динамичности по напряжению, больше 1,0 и составляют 1,299-1,499. Эти данные распространяются на линейные и нелинейные участки графиков, представленных на рисунке 3. Для линейных участков графиков (характеризующих упругую работу бетона) значения коэффициента динамичности по деформации равны 0,619-0,667, а значения коэффициента динамичности по напряжению – 1,414-1,499.

Как видно, приведенные результаты подтверждают наши утверждения. Следовательно, при ударе, нагрузка и напряжение, будут больше соответствующей статической нагрузки и статического напряжения, а динамическая деформация будет меньше соответствующей статической деформации. В связи с этим важно отметить, что формулы (38) и (43) позволяют получать результаты, которые противоречат результатам экспериментальных исследований [54] и формуле (53).

Определение модулей упругости. Для определения коэффициентов динамичности по формулам (50) и (53) необходимы значения модулей упругости (материалов) элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт». Значения модулей упругости материалов, как правило, приведены в справочных пособиях и нормативных документах. Динамические модули упругости амортизаторов, используемых в наголовниках сваебойных молотов, представлены в Руководстве [55]. Для удобства определения этих параметров предлагаем использовать формулы (54) и (55), которые получены нами путем обработки данных, представленных в Руководстве [55] (рис. 4-11).

$$E_a^d = r\sigma_c^d + t, \quad (54)$$

$$E_a^d = z \ln(\sigma_c^d) + \varepsilon, \quad (55)$$

где: E_a^d – модуль упругости амортизатора (в наголовнике молота или в упорном выступе шаблона штампа); σ_c^d – динамическое сжимающее напряжение в головной части сваи при ударе молота; r и t – коэффициенты, принимаемые по таблице 4; z и ε – коэффициенты, принимаемые по таблице 5.

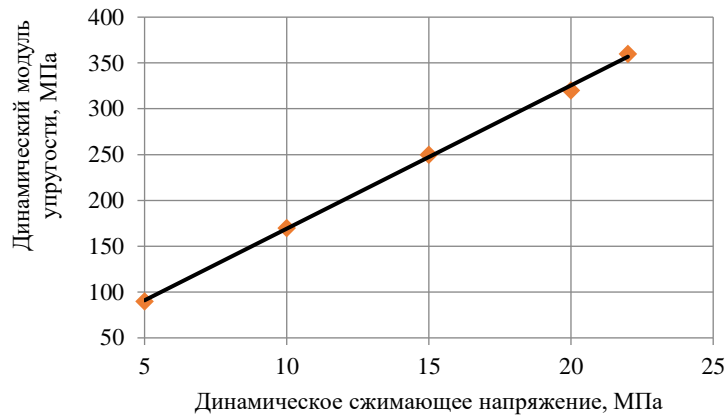


Рис. 4. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из сосны (при любом расположении волокон относительно сжатия) от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,4)



Рис. 5. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из дуба (при перпендикулярном расположении волокон относительно сжатия) от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,6)

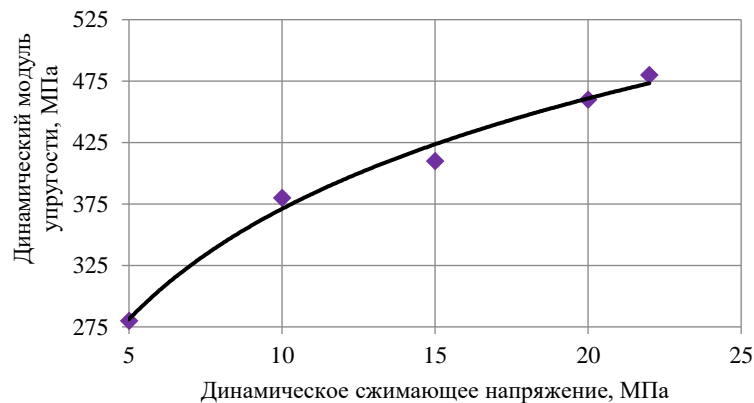


Рис. 6. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из березовой фанеры от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,7)

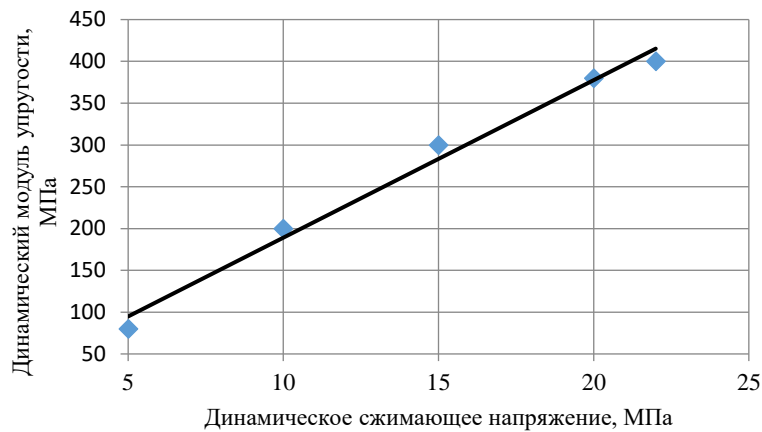


Рис. 7. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из грубошерстного технического войлока от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,4)

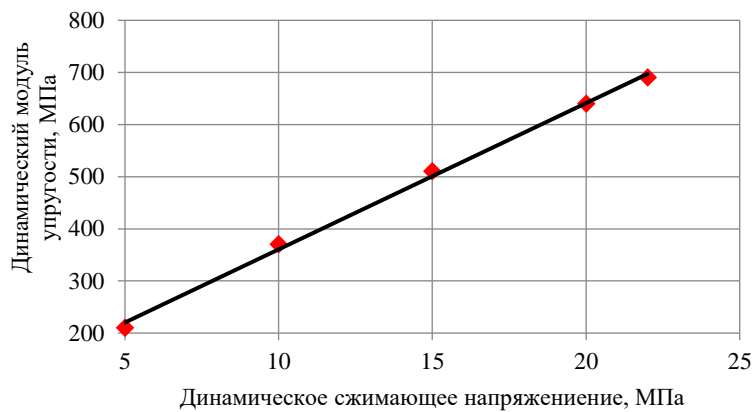


Рис. 8. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из бельного пенкового каната от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,45)

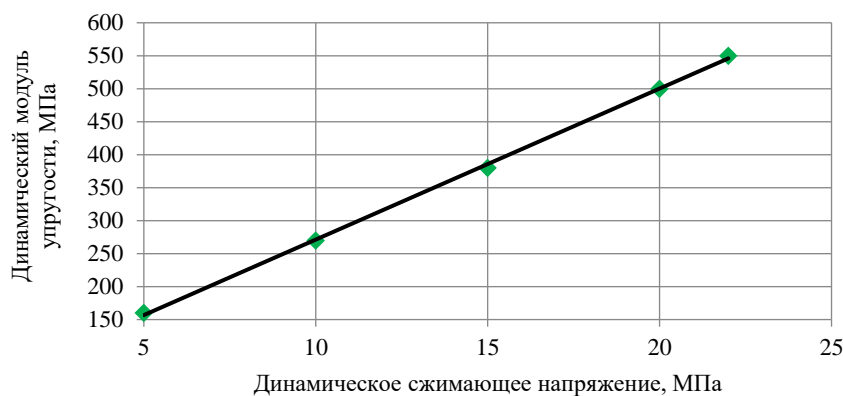


Рис. 9. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из шнурового асбеста от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 0,30)

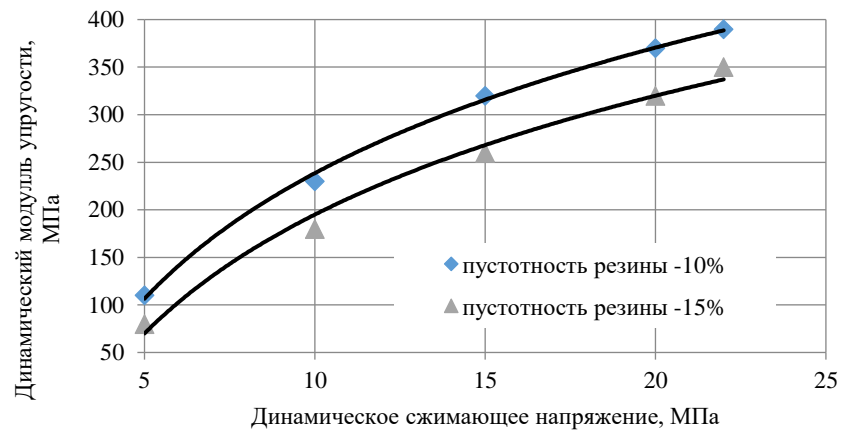


Рис. 10. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из теплостойкой технической резины (с пустотностью 10 и 15%) от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 1,0)

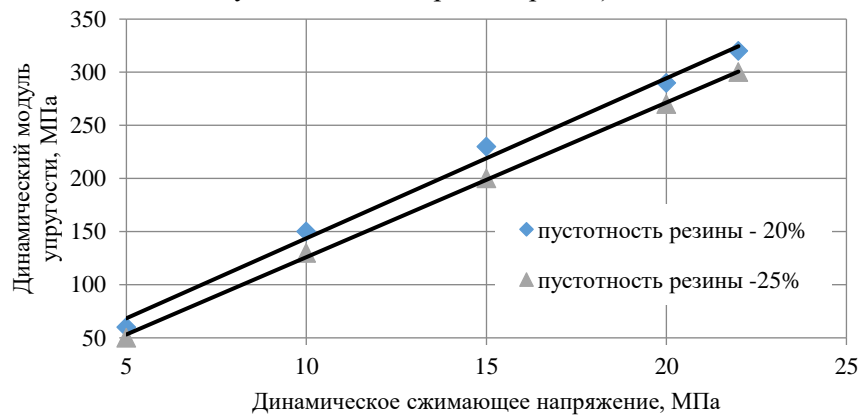


Рис. 11. Зависимость динамического модуля упругости амортизатора из теплостойкой технической резины (с пустотностью 20 и 25%) от динамического сжимающего напряжения (при значении коэффициента уплотнения амортизатора 1,0)

Таблица 4

Значения коэффициентов r и t в формуле (54)

Вид материала амортизатора	Коэффициент уплотнения амортизатора	Значения коэффициентов		Показатель достоверности аппроксимации R^2
		r	t , МПа	
1	2	3	4	6
Сосна (при любом расположении волокон относительно направления сжатия)	0,40	15,639	12,799	0,9990
Дуб (при перпендикулярном расположении волокон относительно направления сжатия)	0,60	12,83	205,25	0,9896

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
Грубошерстный технический войлок	0,40	18,844	0,6491	0,9879
Бельный пенковый канат	0,45	28,053	80,041	0,9979
Шнуровой асбест	0,30	22,901	42,231	0,9994
Теплостойкая техническая резина с пустотностью:				
- 20 %;	1,0	15,060	- 6,8763	0,9940
- 25%.	1,0	14,554	-19,574	0,9993

Таблица 5

Значения коэффициентов z и ε в формуле (55)

Вид материала амортизатора	Коэффициент уплотнения амортизатора	Значения коэффициентов		Показатель достоверности аппроксимации R^2
		z	ε , МПа	
Березовая фанера	0,70	129,630	72,552	0,9874
Теплостойкая техническая резина с пустотностью:				
- 10 %;	1,0	190,430	-199,960	0,9980
- 15%.	1,0	180,300	- 220,220	0,9885

Шабот молота, наголовник сваи и шаблон штампа изготавливаются из стальных элементов. Статический модуль упругости стали зависит от его структуры, химического состава и температуры. Значения модуля упругости сталей составляют $1,65-3,40 \times 10^5$ МПа. Значения модулей упругости арматурной стали, используемой для изготовления свай, приведены в таблице 6. Динамический модуль стали на 2-5% выше его статического модуля упругости из-за отсутствия ползучести при кратковременно действующей нагрузке. Поэтому допускается значения динамического модуля упругости стали принимать равным значению его статического модуля упругости, умноженному на коэффициент 1,02-1,05.

Таблица 6

Значения статического модуля упругости арматуры сваи

Вид арматуры сваи	Класс арматуры	Значения модуля упругости, МПа
Стержневая	A-I, A-2	210000
	A-III, A-IV	200000
	A-V, A _T -IV, A _T -V и A _T -VI	190000
Арматурная проволока	B-1, B-II и B _p -II	200000
	B _p -I	170000
Арматурные канаты	K-7	180000

Для определения коэффициентов динамичности для сваи необходимы значения модуля упругости железобетона. К сожалению, в настоящее время в научно-технической литературе отсутствуют данные об этом параметре, а

также не существуют аналитические методы его определения. Поэтому динамический модуль упругости железобетона $E_{жб}^d$ предлагается устанавливать в виде осредненного параметра (по площади сечений арматуры и бетона сваи) по следующей формуле:

$$E_{жб}^d = (E_6^d A_6 + E_{ar}^d A_{ar}) / (A_6 + A_{ar}), \quad (56)$$

где: E_6^d - динамический модуль упругости бетона сваи; A_6 - площадь сечения бетона сваи; E_{ar}^d - динамический модуль упругости арматуры сваи; A_{ar} - площадь сечений продольных арматурных стержней сваи.

Наряду с формулой (56) динамический модуль упругости железобетона можно определять в виде приведенного параметра (посредством учета доли армирования бетона) по формуле (57), представленной в работе [56]:

$$E = E_s \mu + E_d (1 - \mu), \quad (57)$$

где: E - приведенный динамический модуль упругости железобетона; E_s - модуль упругости арматуры; μ - доля армирования сечения элемента; E_d - динамический модуль упругости бетона.

Динамический модуль упругости бетона в формулах (56) и (57) зависит от множества факторов, в том числе, и от таких как [54,56,57]:

- вид и состав компонентов;
- технология изготовления;
- условия и сроки твердения;
- плотность и прочностные свойства;
- скорость и продолжительность динамического нагружения;
- уровень динамических напряжений.

Динамический модуль упругости бетона E_6^d в зависимости от уровня динамического напряжения σ_c^d в нем можно определять по следующей формуле [58]:

$$E_6^d = E_6^c / \left\{ 1 - 0,15 \left[\frac{(\sigma_c^d - 40)}{100} \right] \right\}, \quad (58)$$

Динамический модуль упругости бетона E_6^d в зависимости от его призматической прочности $R_{пр}$ можно определять по следующей формуле [58]:

$$E_6^d = E_6^c / \left\{ 1 - 0,001 [\sigma_c^d - (R_{пр}/10)] \right\}, \quad (59)$$

Динамический модуль упругости бетона E_6^d в зависимости от продолжительности его динамического нагружения τ устанавливается по следующей формуле [54]:

$$E_6^d = b e^{-c \ln \tau}, \quad (60)$$

где: b и c - коэффициенты, принимаемые по таблице 7 (для бетона при водоцементном отношении равном 0,5 и соотношении основных компонентов равном 1:3:5).

Таблица 7

Значения коэффициентов b и c в формуле (60)

Относительная деформация сжатия бетона	Значения коэффициентов	
	b	c
$\varepsilon = 0,25 \varepsilon_{пр}$	27,2	0,018
$\varepsilon = 0,50 \varepsilon_{пр}$	26,3	0,024
$\varepsilon = 0,75 \varepsilon_{пр}$	24,8	0,030
$\varepsilon = \varepsilon_{пр}$	22,1	0,033

Примечание: $\varepsilon_{пр}$ - предельное значение относительной деформации сжатия бетона

При использовании формулы (60) продолжительность процесса динамического нагружения сваи молотом рекомендуется принимать равным [43]:

- 0,009 ÷ 0,018 сек для трубчатого дизельного молота (с весом ударной части 18 кН);

- 0,08 ÷ 0,17 сек для штангового дизельного молота (с весом ударной части 25 кН).

Для других видов и типов молотов ударного действия продолжительность ударного контакта следует устанавливать либо экспериментально, либо по данным предприятий-производителей молотов.

Кроме формул (57)-(59) существуют и другие формулы, устанавливающие зависимость между статическим и динамическим модулями упругости бетона. Некоторые из них, в том числе и те, которые распространены в зарубежной практике, приведены в таблице 8 [56]. Эти корреляционные зависимости также рекомендуются использовать для приближенного определения динамического модуля упругости бетона.

Таблица 8

Корреляционные зависимости между статическими и динамическими модулями упругости бетона [56]

Корреляционные зависимости	Параметры и (или) условия применения
$E_b = 0,83 E_d$ $E_b = 0,823 E_d$	E_b – статический модуль упругости бетона E_d - динамический модуль упругости бетона
$E_b = 1,25 E_d - 19$	те же параметры
$E_b = E_d - 5864$	те же параметры, при отношении напряжения в бетоне к его прочности равном 0,24, скорости нагружения равном 0,24 МПа/сек и температуре равном 20°C.
$E_b = k E_d^{1,4} \rho^{-1}$	ρ - плотность бетона k – коэффициент, равный 0,23
$E_d = 26,27 E_b^{0,19}$	для высокопрочного бетона (элементы цилиндрической формы)

Заключение. Вышеизложенные результаты исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Существующие формулы, предназначенные для определения сопротивления свай по результатам динамических испытаний, имеют ряд значительных недостатков, к которым относятся неучет характера динамического сопротивления сжатию соударяющихся элементов (кроме грунта) системы «молот-свая-грунт», подмена динамического сопротивления свай статическим сопротивлением и др.;

2. Действующий порядок проведения динамических испытаний и применяемые формулы, в том числе и те, которые входят в состав нормативных документов РК, не адаптированы к условиям устройства комбинированного свайного фундамента, в котором ростверк, устраивается в котловане, выштампованном в околосовайном грунте;

3. Определен перечень технологических операций и порядок проведения динамических испытаний комбинированного свайного фундамента с применением стального шаблона, обладающего формой и размерами штампа, принятого для выштамповывания котлована;

4. Определены исходные предпосылки, характеризующие особенности взаимодействия элементов системы «молот-шаблон штампа-свая-грунт», при ударе молота, и на их основе составлены уравнения энергетического баланса для двух ударных режимов работы дизельных молотов (без подачи и с подачей топлива в камеру сгорания молота) при динамических испытаниях;

5. На основе решения уравнений энергетического баланса получены формулы по определению динамического сопротивления грунта, внедрению шаблона штампа и сваи, при ударе молота. В состав формул, включен, коэффициент, учитывающий характер деформирования грунта при погружении сваи и шаблона штампа, и по величине которого можно судить о достижении или же недостижении грунтом предельного состояния;

6. Получены формулы по определению динамических нагрузок и динамических деформаций ударяющихся элементов системы «молот-свая-грунт» с использованием коэффициентов динамичности по нагрузке и деформации;

7. Обоснованы и предложены новые формулы по определению коэффициентов динамичности в виде отношения динамических и статических модулей упругости материалов элементов данной системы;

8. Разработаны предложения по определению динамических модулей материала амортизаторов в наголовнике молота и в упорном выступе шаблона штампа, бетона и железобетона сваи, а также стали, из которого изготавливаются наголовник, шабот и элементы шаблона штампа;

9. Предложена формула по определению статического сопротивления сваи и свайного ростверка в виде разницы между динамическим и вязким сопротивлением грунта, которая зависит от скорости перемещения сваи при ударе молота.

Список литературы

1. Метс, М. Определение несущей способности свай с помощью статических и динамических испытаний [Текст] / М. Метс, Е. Мусатова // Материалы международной научно-технической конференции / Геотехника Беларуси: наука и практика. – Минск: БНТУ, 2013. – С.178-194.
2. Герсеванов, Н.М. Определение сопротивления свай [Текст] / Н.М. Герсеванов. – М.: Госстройиздат, 1932. – 56 с.
3. Русанов, Г.А. Определение сопротивления свай динамическим методом с учетом упругих деформаций [Текст] / Г.А. Русанов // Научное сообщение НИИ Мосстроя. – М: НИИ Мосстрой, 1958. - Выпуск 12. – 7 с.
4. Тикунов, П.Р. Определение сопротивления свай по данным забивки свай с учетом упругих перемещений грунта и свай [Текст] / П.Р. Тикунов // Сборник НИИОСП / Основания и фундаменты. – М.: Госстройиздат, 1959. - С.42-47.
5. Малиновский, А.Ф. Исследование сопротивления забивных свай и их совместной работы с грунтом по данным испытаний [Текст]: автореферат

- диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.Ф. Малиновский. – М: МИСИ, 1969. – 19 с.
6. Ерошенко, В.Н. Свайные фундаменты в пластичномерзлых грунтах [Текст] / В.Н. Ерошенко. – Ленинград: Стройиздат, 1972. – 174 с.
 7. Гинзбург, Л.Я. Определение несущей способности свай в суглинках по результатам динамических испытаний [Текст] / Л.Я. Гинзбург // Сборник НИИОСП / Основания, фундаменты и подземные сооружения». – М.: Стройиздат, 1972. - Выпуск № 63. - С.133-136.
 8. Бахолдин, Б.В. Исследование сопротивления грунтов при динамических испытаниях свай [Текст] / Б.В. Бахолдин, Л.Я. Гинзбург // Труды НИИОСП им. Н.М. Герсевича / Свайные фундаменты. – М.: Стройиздат, 1975. – №65. – С. 97-115.
 9. Гугнин, А.А. О выборе сваебойного оборудования с учетом грунтовых условий [Текст] / А.А. Гугнин // Межвузовский сборник научных трудов / Основания и фундаменты. – Пермь: ПГУ, 1978. – С.40-45.
 10. Бахолдин, Б.В. Методика выбора сваебойного оборудования в зависимости от грунтовых условий [Текст] / Б.В. Бахолдин, А.А. Гугнин // Труды НИИОСП им. Н.М. Герсевича / Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1980 – №71. – С. 72-82.
 11. Бахолдин, Б.В. Обобщенный метод прогнозирования несущей способности свай по результатам динамических испытаний [Текст] / Б.В. Бахолдин // Труды IV международной конференции по проблемам свайного фундаментостроения. – Пермь: ПГТУ, 1994. – Часть 1. – С. 59-63.
 12. Бекбасаров, И.И. О некоторых аспектах теоретического совершенствования динамического метода определения сопротивления свай [Текст] / И.И. Бекбасаров // Материалы Всероссийской национальной конференции с международным участием / Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий. – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2017. – С.362-372.
 13. Бекбасаров, И.И. О теоретическом совершенствовании метода определения сопротивления свай по результатам их динамических испытаний [Текст] / И.И. Бекбасаров // Научно - практический журнал / Строительство и архитектура. – М.: ООО «Издательский центр РИОР», 2017. – Том 5. - Выпуск 2(15). С.32-41.
 14. Чернышев, Ю.Г. О коэффициенте восстановления при забивке свай [Текст] / Ю.Г. Чернышев // Известия ВУЗов / Строительство и архитектура. - Новосибирск, 1972. № 7. - С. 148-151.
 15. Чернышев, Ю.Г. Анализ и проверка формул для подбора энергетических параметров молотов [Текст] / Ю.Г. Чернышев // Труды Фрунзенского политехнического института / Строительство и архитектура. – Фрунзе: Типография ФПИ, 1976. – Выпуск 87. - С.136-143.
 16. Тюреходжаев, А.Н. Осадка сваи при ударе и установление параметров сопротивления грунта [Текст] / А.Н. Тюреходжаев // Известия АН КазССР / Серия физико-математическая. – 1973. - №5. – С.58-65.
 17. Тюреходжаев, А.Н. Распространение волн в свае, движущейся в многослойном грунте [Текст] / А.Н. Тюреходжаев // Известия АН КазССР / Серия физико-математическая. – 1979. - №1. – С.57-62.
 18. Гончаров, Б.В. Колебания грунта как критерий оценки предельного сопротивления свай в процессе забивки [Текст] / Б.В. Гончаров, В.Ф. Ковалев, М.З. Фукс. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича, 1985. – С.21-24.
 19. Гольдштейн, В.М. Анализ эффективности динамических методов расчета скорости погружения и несущей способности забивных свай [Текст] / В.М. Гольдштейн, М.Н. Гольдштейн, Н.С. Швец, В.Г. Шаповал. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича, 1985. – С.204-207.

20. Султанов, К.С. Влияние физико-механических свойств грунтов на погружение свай [Текст] / К.С. Султанов, Ж.А. Даминов // Сборник тезисов докладов 1 региональной конференции / Строительство на структурно-неустойчивых грунтах. – Самарканд: МВП «САМСНАБ», 1992. – С.121-122.
21. Гончаров, Б.В. К вопросу о выборе молота с учетом размеров свай и характеристик грунта [Текст] / Б.В. Гончаров // Труды БашНИИИстроя / Строительство предприятий нефтепереработки и нефтехимии. – М.: Стройиздат, 1966. – С.208-214.
22. Шахирев, В.Б. Совершенствование статических и динамических испытаний свай [Текст] / В.Б. Шахирев, Г.И. Сивицкий. Тезисы докладов и сообщений всесоюзной конференции по совершенствованию технологии работ нулевого цикла с использованием средств механизации и автоматизации. – Уфа: НИИПромстрой, 1981. – С.42-45.
23. Бартоломей, А.А. Ресурсосберегающие технологии возведения фундаментов из свай заводской готовности [Текст] / А.А. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, Б.В. Гончаров и др. – М.: Стройиздат, 1990. – 111 с.
24. Медведева, О.П. Определение несущей способности пирамидально-призматических свай по результатам динамических испытаний [Текст] / О.П. Медведева, Н.Ф. Буланкин // Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – Пермь: РИО ПГТУ, 2000. – С.196-199.
25. Бартоломей, А.А. Основы импульсной технологии устройства фундаментов [Текст] / А.А. Бартоломей, В.Н. Григорьев, И.М. Омельчак, О.Г. Пенский. – Пермь: РИО ПГТУ, 2002. – 174 с.
26. Чичерин, И.И. К вопросу погружения свай [Текст] / И.И. Чичерин, И.П. Ярмолович // Сборник научных трудов ВЗПИ / Строительство. – М.: Всесоюзный заочный политехнический институт, 1978. – С.103-111.
27. Чанышев, А.И. Определение сопротивления среды при внедрении в нее жесткого тела [Текст] / А.И. Чанышев, О.Е. Белоусова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Новосибирск: Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 2025. -№9. – С.5-14.
28. Методические рекомендации по проведению полевых испытаний свай и сооружений ПГС методом ЭЛДИ с применением ударной нагрузки [Текст]. – М.: ГУП НИИОСП и. Н.М. Герсевичева, 2002. – 23 с.
29. Офрихтер, Я.В. Использование волновой теории удара для определения несущей способности свай [Текст] / Я.В. Офрихтер, А.Б. Пономарев // Вестник Пермского НИПУ / Строительство и архитектура. – Пермь: ПНИПУ, 2019. – Том 10. - №3. – С.35-43.
30. Попсуенко, И.К. Интерпретация результатов испытаний забивных трубчатых свай с грунтовой пробкой [Текст] / И.К. Попсуенко, С.П. Пятковский, А.В. Бессмертный // Вестник НИЦ «Строительство». – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевичева, 2020. - №3(26). – С.64-73.
31. Мухин, А.А. К вопросу о применении метода испытаний свай динамической нагрузкой с использованием принципов волновой теории удара [Текст] / А.А. Мухин, А.А. Чуркин, К.А. Филиппов, А.В. Гаврютина // Международный научно-технический журнал / Геотехника. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2020. – Том XII. - №2. – С.70-87.
32. МСП 5.01-101-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов [Текст]. – Астана: Комитет по делам строительства ЖКХ МИТ РК, 2007. – 146 с.
33. МГС (ГОСТ 5686-12). Грунты. Метод полевых испытаний сваями [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2014. – 42 с.
34. Нарбут, Р.М. Работа свай в глинистых грунтах [Текст] / Р.М. Нарбут. – Ленинград: Стройиздат, 1972. – 160 с.
35. Бахолдин, Б.В. Энергия удара дизель-молота при погружении свай [Текст] / Б.В. Бахолдин // Труды НИИОСП им. Н.М. Герсевичева / Основания,

- фундаменты и подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1977. – Выпуск № 66. – С. 40-45.
36. Новожилов, Г.Ф. Бездефектное погружение свай в талых и вечномёрзлых грунтах [Текст] / Г.Ф. Новожилов. – Ленинград: Стройиздат, 1987. – 111 с.
37. Абрамов, В.Е. Динамическое взаимодействие дизель-молота и свай в процессе ее погружения в грунт [Текст] / В.Е. Абрамов // Материалы V всесоюзной конференции / Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений. – М. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1981. – Том 1. – С. 165-167.
38. Бекбасаров, И.И. Определение энергии удара дизель-молота при забивке свай в грунты [Текст] / И.И. Бекбасаров // Научный журнал ПГУ им. С. Торайгырова / Наука и техника Казахстана. - Павлодар, 2004. - №1. - С. 139-145.
39. Бекбасаров, И.И. Определение высоты подъема ударной части дизель-молота при погружении свай [Текст] / И.И. Бекбасаров // Труды геотехнической конференции, посвященной году РФ в РК: «Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов». – Алматы, 2004. – С.601-604.
40. Бадьин, Г.М. О коэффициенте n в формуле Н.М. Герсеванова и методике его определения [Текст] / Г.М. Бадьин. – В кн.: Несущая способность свай в слабых грунтах. - Ленинград, 1966. - Часть 2. - С. 67-69.
41. Баходдин, Б.В. Об эмпирическом коэффициенте n в динамической формуле профессора Н.М. Герсеванова и методике его определения [Текст] / Б.В. Баходдин, Л.Я. Гинзбург // Научные труды НИИОСП. - М.: Стройиздат, 1971. - Выпуск 61. – С. 135-138.
42. Федоров, В.И. К вопросу повышения точности оценки несущей способности свай, по результатам динамических испытаний [Текст] / В.И. Федоров // Тезисы докладов и сообщений всесоюзной конференции: «Совершенствование технологии работ нулевого цикла с использованием средств механизации и автоматизации». - Уфа, 1981. – С. 45-47.
43. Бекбасаров, И.И. Работа свай из шлакощелочного бетона в различных грунтовых условиях при действии статических и динамических нагрузок [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / И.И. Бекбасаров. – Пермь: ППИ, 1983. – 22 с.
44. Савельев, И.В. Курс физики [Текст] / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1989. – 352 с.
45. Бекбасаров, И.И. Об энергоёмкости забивки штампа и свай разной длины при устройстве ленточного комбинированного свайного фундамента (исследования на моделях) [Текст] / И.И. Бекбасаров, Е.И. Атенев, Н.А. Шаншабаев // Научный журнал / Механика и технологии. – Тараз: НАО «Таразский университет им. М.Х. Дулати», 2024. - №2 (84). – С.190-206. <https://doi.org/10.55956/ZBJU3224>.
46. Бекбасаров, И.И. Способ динамического испытания комбинированного свайного фундамента [Текст] И.И. Бекбасаров, Е.И. Атенев, Н.А. Шаншабаев / Патент РК №9206 на полезную модель. - Астана: РГП НИИС, 2025. – Сайт: www.kazpatent.kz, раздел “Государственный реестр полезных моделей республики Казахстан».
47. Бекбасаров, И.И. Забивные свайные конструкции зданий и сооружений [Текст] / И.И. Бекбасаров. – Алматы: «КЕМЕЛ КИТАР», 2025. – 409 с.
48. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01. 83*. -М.: Российский институт стандартизации, 2016. – 220 с.
49. Кочетков, А.В. Некоторые вопросы теории удара [Текст] / А.В. Кочетков, П.В. Федотов // Интернет-журнал / Науковедение. – М.: Институт государственного управления, права и инновационных технологий, 2013. - №5. – С.1-15.
50. Соляник-Красса, К.В. Введение в механику деформируемого твердого тела [Текст] / К.В. Соляник-Красса. - Ленинград: Издательство Ленинградского государственного университета, 1976. – 408.

51. Снитко, Н.К. Анализ амплитуд колебаний при забивке свай и осадок поверхности грунта [Текст] / Н.К. Снитко // Межвузовский тематический сборник трудов / Механика грунтов, основания и фундаменты. – Ленинград: ЛИСИ, 1979. – С.28-34.
52. Степин, П.А. Сопротивление материалов [Текст]: учебник / П.А. Степин. – М.: Высшая школа, 1983. – 303 с.
53. Манжосов, В.К. Модели продольного удара [Текст] / В.К. Манжосов. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2006. – 160 с.
54. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
55. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов [Текст]. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1977. – 241 с.
56. Бабанов, В.В. Назначение жесткостных параметров железобетонных конструкций в конечно-элементных динамических расчетах сооружений [Текст] / В.В. Бабанов, Н.А. Евсеев // Научно-технический и производственный журнал / Жилищное строительство. – М., 2017. - №12. – С.26-29.
56. Рузанов, П.А. Математическое моделирование процессов динамического деформирования и разрушения бетонов в двумерной постановке: диссертация на соискание кандидата физико-математических наук [Текст] / П.А. Рузанов. Специальность: 01.02.04. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 1999. – 147 с.
58. Лещинский, М.Ю. Испытание бетона [Текст]: справочное пособие / М.Ю. Лещинский. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.

Исследования выполнены в рамках проекта АР26197175 на тему «Разработка технологии производства работ по устройству ленточных свайных фундаментов с ростверками в выштампованных траншеях», профинансированного Комитетом науки МНВО РК.

Материал поступил в редакцию 21.03.26, принят 23.06.26.

И.И. Бекбасаров¹, Е.И. Атенов¹, Н.А. Шаншабаев¹

¹*М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан*

ШТАМПАЛҒАН ҚАЗАНШҰҢҚЫРДА ОРНАТЫЛҒАН ҚАДА МЕН РОСТВЕРКТИҢ ЖҮК КӨТЕРГІШТІГІН БАҒАЛАУДЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ӘДІСІ

Аңдатпа. Динамикалық сынақ нәтижелері бойынша қадалардың кедергісін анықтауға арналған формулаларды талдау нәтижелері көрсетілген. Олардың кемшіліктері анықталған. Динамикалық сынақтарды жүргізудің қолданыстағы әдістемесі мен қолданылатын формулалар ростверкті қадалар маңында штампталған қазаншұңқырға орналастырылған жағдайдағы аралас қадалы іргетас орнату жағдайына бейімделмегені анықталған. Технологиялық операциялардың тізбесі және аралас қадалар іргетасын динамикалық сынау тәртібі анықталған. Сынақтарды орындау үшін мөртабанды имитациялайтын болат қуыс үлгіні пайдалану ұсынылады. Балға соғылған кезде "балға-мөртабан-қадалар-топырақ" жүйесінің элементтерінің өзара әрекеттесу ерекшеліктерін сипаттайтын бастапқы алғышарттар келтірілген және олардың негізінде дизельді балғалардың екі соққы режимі үшін энергетикалық тепе-теңдік теңдеулері жасалған (балғаның жану камерасына отын берілмеген және берілген жағдайда). Энергия балансының теңдеулері негізінде топырақтың динамикалық кедергісін анықтау, соққы кезінде штамп пен қаданың үлгісін енгізу формулалары алынған. Формулалар қадалар мен мөртабан үлгісін батыру кезінде

топырақтың деформациялану сипатын, сондай-ақ "балға-мөртабан-қадалар-топырақ" жүйесі элементтерінің динамикалық параметрлерін (динамикалық жүктемелер, динамикалық деформациялар, жүктеме мен деформациялар бойынша динамикалық коэффициент) ескереді. Балға соғылған кезде қаданың қозғалу жылдамдығына байланысты динамикалық және тұтқыр топырақ кедергісі арасындағы айырмашылық түрінде қадалар мен қадалы ростверктің статикалық кедергісін анықтау формуласы ұсынылған.

Тірек сөздер: қада, мөртабан, балға, шаблон, ростверк, топырақ, соққы, қарсылық, тұтқыр қарсылық, қаданың шөгуге тоқтауы, жылдамдық, динамизм коэффициенті, серпімділік модулі.

I.I. Bekbasarov¹, Y.I. Atenov¹, N.A. Shanshabaev¹

¹*M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan*

DYNAMIC METHOD FOR ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF PILES AND GRILLWORK ARRANGED IN A STAMPED EXCAVATION

Abstract. The results of the analysis of formulas designed to determine the resistance of piles based on the results of dynamic tests are presented. Their shortcomings have been identified. It has been established that the existing dynamic testing methodology and the formulas used are not adapted to the conditions of the combined pile foundation, in which the grillwork is arranged in a excavation stamped in the near-pile soil. The list of technological operations and the procedure for conducting dynamic tests of a combined pile foundation are defined. It is proposed to use a hollow steel template imitating a stamp to perform the tests. The initial prerequisites characterizing the features of the interaction of the elements of the hammer-stamp-pile-ground system upon impact of a hammer are given, and based on them, the energy balance equations for two shock modes of operation of diesel hammers (without and with fuel supply to the combustion chamber of the hammer) are compiled. Based on the energy balance equations, formulas were obtained for determining the dynamic resistance of the soil, the introduction of a stamp template and piles, upon impact. The formulas take into account the nature of soil deformation during the immersion of the pile and the stamp template, as well as the dynamic parameters of the elements of the hammer-stamp template-pile-soil system (dynamic loads, dynamic deformations, dynamic coefficient of load and deformation). A formula is proposed for determining the static resistance of a pile and a pile grillage in the form of the difference between the dynamic and viscous resistance of the soil, which depends on the speed of movement of the pile upon impact of a hammer.

Keywords: pile, stamp, hammer, template, grillage, soil, impact, resistance, viscous resistance, failure, velocity, coefficient of dynamism, modulus of elasticity.

References

1. Mets M., Musatova E. Opredeleniye nesushchey sposobnosti svay s pomoshch'yu staticheskikh i dinamicheskikh ispytaniy [Determination of the bearing capacity of piles using static and dynamic tests] // Proceedings of the international scientific and technical conference / Geotechnics of Belarus: science and practice. - Minsk: BNTU, 2013. - Pp. 178-194. [in Russian].
2. Gersevanov N.M. Opredeleniye soprotivleniya svay [Determination of pile resistance]. - Moscow: Gosstroyizdat, 1932. - 56 p. [in Russian].
3. Rusanov G.A. Opredeleniye soprotivleniya svay dinamicheskim metodom s uchetom uprugikh deformatsiy [Determination of pile resistance by the dynamic method taking into account elastic deformations] // Scientific report of the Research Institute of Mosstroy. - Moscow: Research Institute of Mosstroy, 1958. - Issue 12. - 7 p. [in Russian].

4. Tikunov P.R. Opredeleniye soprotivleniya svay po dannym zabivki svay s uchedom uprugikh peremeshcheniy grunta i svay [Determination of pile resistance based on pile driving data taking into account elastic displacements of soil and piles] // Collection of NIIOSP / Foundations and foundations. - Moscow: Gosstroyizdat, 1959. - Pp. 42-47. [in Russian].
5. Malinovsky A.F. Issledovaniye soprotivleniya zabivnykh svay i ikh sovместnoy raboty s gruntom po dannym ispytaniy [Study of the resistance of driven piles and their joint work with soil based on test data]: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. - Moscow: MISI, 1969. - 19 p. [in Russian].
6. Eroshenko V.N. Svaynyye fundamenty v plastichnomerzlykh gruntakh [Pile foundations in plastically frozen soils]. - Leningrad: Stroyizdat, 1972. - 174 p. [in Russian].
7. Ginzburg L.Ya. Opredeleniye nesushchey sposobnosti svay v suglinkakh po rezul'tatam dinamicheskikh ispytaniy [Determination of the Bearing Capacity of Piles in Loams Based on the Results of Dynamic Tests] // Collection of NIIOSP / Foundations, Foundations, and Underground Structures. - Moscow: Stroyizdat, 1972. - Issue No. 63. - Pp. 133-136. [in Russian].
8. Bakhholdin B.V., Ginzburg L.Ya. Issledovaniye soprotivleniya gruntov pri dinamicheskikh ispytaniyakh svay [Study of Soil Resistance during Dynamic Tests of Piles] // Works of the N.M. Gersevanov NIIOSP / Pile Foundations. - Moscow: Stroyizdat, 1975. - No. 65. - Pp. 97-115. [in Russian].
9. Gugin, A.A. O vybore svayeboynogo oborudovaniya s uchedom gruntovykh usloviy [On the Selection of Pile Driving Equipment Taking into Account Soil Conditions] // Interuniversity Collection of Scientific Papers / Foundations and Foundations. - Perm: PSU, 1978. - P.40-45. [in Russian].
10. Bakhholdin B.V., Gugin A.A. Metodika vybora svayeboynogo oborudovaniya v zavisimosti ot gruntovykh usloviy [Methodology for Selecting Pile Driving Equipment Depending on Soil Conditions] // Proceedings of the N.M. Gersevanov Research Institute of Instrument Engineering / Foundations, Foundations, and Underground Structures. - Moscow: Stroyizdat, 1980 - No. 71. - P. 72-82. [in Russian].
11. Bakhholdin B.V. Obobshchennyy metod prognozirovaniya nesushchey sposobnosti svay po rezul'tatam dinamicheskikh ispytaniy [Generalized Method for Predicting the Bearing Capacity of Piles Based on the Results of Dynamic Tests] // Proceedings of the IV International Conference on Pile Foundation Engineering. - Perm: PSTU, 1994. - Part 1. - P. 59-63. [in Russian].
12. Bekbasarov I.I. O nekotorykh aspektakh teoreticheskogo sovershenstvovaniya dinamicheskogo metoda opredeleniya soprotivleniya svay [On Some Aspects of Theoretical Improvement of the Dynamic Method for Determining Pile Resistance] // Proceedings of the All-Russian National Conference with International Participation / Deep Foundations and Geotechnical Problems of Territories. - Perm: PNRPU Publishing House, 2017. - Pp. 362-372. [in Russian].
13. Bekbasarov I.I. O teoreticheskom sovershenstvovanii metoda opredeleniya soprotivleniya svay po rezul'tatam ikh dinamicheskikh ispytaniy [On Theoretical Improvement of the Method for Determining Pile Resistance Based on the Results of Their Dynamic Tests] // Scientific and Practical Journal / Construction and Architecture. - Moscow: OOO "RIOR Publishing Center", 2017. - Volume 5. - Issue 2 (15). Pp. 32-41. [in Russian].
14. Chernyshev Yu.G. O koeffitsiyente vosstanovleniya pri zabivke svay [On the Coefficient of Restoration during Pile Driving] // News of Higher Education Institutions / Construction and Architecture. - Novosibirsk, 1972. No. 7. - P. 148-151. [in Russian].

15. Chernyshev Yu.G. Analiz i proverka formul dlya podbora energeticheskikh parametrov molotov [Analysis and verification of formulas for selecting the energy parameters of hammers] // Proceedings of the Frunze Polytechnic Institute / Construction and architecture. - Frunze: FPI Printing House, 1976. - Issue 87. - P. 136-143. [in Russian].
16. Tyurekhodzhaev A.N. Osadka svai pri udare i ustanovleniye parametrov soprotivleniya grunta [Pile settlement upon impact and determination of soil resistance parameters] // Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR / Physical and Mathematical Series. - 1973. - No. 5. - P. 58-65. [in Russian].
17. Tyurekhodzhaev A.N. Rasprostraneniye voln v svaye, dvizhushcheyasya v mnogosloynnom grunte [Wave Propagation in a Pile Moving in Multilayer Soil] // Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR / Physical-Mathematical Series. - 1979. - No. 1. - P. 57-62. [in Russian].
18. Goncharov B.V., Kovalev V.F., Fuks M.Z. Kolebaniya grunta kak kriteriy otsenki predel'nogo soprotivleniya svay v protsesse zabivki [Soil Oscillations as a Criterion for Estimating the Ultimate Resistance of Pile Driving]. Abstracts of the VI All-Union Conference on the Dynamics of Bases, Foundations, and Underground Structures. - Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Instrument Engineering, 1985. - P. 21-24. [in Russian].
19. Goldstein V.M., Goldstein M.N., Shvets N.S., Shapoval V.G. Analiz effektivnosti dinamicheskikh metodov rascheta skorosti pogruzheniya i nesushchey sposobnosti zabivnykh svay [Analysis of the Efficiency of Dynamic Methods for Calculating the Driving Speed and Bearing Capacity of Driven Piles]. Abstracts of the VI All-Union Conference on the Dynamics of Bases, Foundations, and Underground Structures. Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Optical and Mechanical Engineering, 1985, pp. 204–207. [in Russian].
20. Sultanov K.S., Daminov Zh.A. Vliyaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov na pogruzheniye svai [Influence of Physical and Mechanical Properties of Soils on Pile Driving] // Collection of abstracts of the 1st regional conference / Construction on structurally unstable soils. Samarkand: MVP "SAMSNAB", 1992. pp. 121–122. [in Russian].
21. Goncharov B.V. K voprosu o vybore molota s uchetom razmerov svay i kharakteristik grunta [On the Selection of a Hammer Taking into Account Pile Dimensions and Soil Characteristics] // Works of BashNIIsroy / Construction of oil refining and petrochemical plants. – Moscow: Stroyizdat, 1966. – Pp. 208-214. [in Russian].
22. Shakhirev V.B., Sivitsky G.I. Sovershenstvovaniye staticheskikh i dinamicheskikh ispytaniy svay [Improvement of Static and Dynamic Tests of Piles] Abstracts of Reports and Communications of the All-Union Conference on Improving the Technology of Zero-Cycle Works Using Mechanization and Automation. - Ufa: NIIpromstroy, 1981. - Pp. 42-45. [in Russian].
23. Bartolomey A.A., Bakholdin B.V., Goncharov B.V., et al. Resursosberegayushchiye tekhnologii vozvedeniya fundamentov iz svay zavodskoy gotovnosti [Resource-Saving Technologies for the Construction of Foundations from Factory-Ready Piles] - Moscow: Stroyizdat, 1990. - 111 p. [in Russian].
24. Medvedeva O.P., Bulankin N.F. Opredeleniye nesushchey sposobnosti piramidal'no-prizmaticheskikh svay po rezul'tatam dinamicheskikh ispytaniy [Determination of the Bearing Capacity of Pyramid-Prismatic Piles Based on the Results of Dynamic Tests] // Proceedings of the international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport structures. – Perm: RIO PSTU, 2000. – pp. 196-199. [in Russian].

25. Bartolomey A.A., Grigoriev V.N., Omelchak I.M., Pensky O.G. Osnovy impul'snoy tekhnologii ustroystva fundamentov [Fundamentals of pulse technology for foundation construction]. – Perm: RIO PSTU, 2002. – 174 p. [in Russian].
26. Chicherin I.I., Yarmolovich I.P. K voprosu pogruzheniya svai [On the issue of pile driving] // Collection of scientific papers of VZPI / Construction. – Moscow: All-Union Correspondence Polytechnic Institute, 1978. – pp. 103-111. [in Russian].
27. Chanyshev A.I., Belousova O.E. Opredeleniye soprotivleniya sredy pri vnedrenii v neye zhestkogo tela [Determination of the resistance of the medium when a rigid body is penetrated into it] // Mining information and analytical bulletin. - Novosibirsk: N.A. Chinakal Mining Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2025. - No. 9. - P. 5-14. [in Russian].
28. Methodical recommendations for conducting field tests of piles and PGS structures using the ELDI method using impact loading. - M: GUP NIIOSP and. N.M. Gersevanova, 2002. - 23 p. [in Russian].
29. Ofrikhter Ya.V., Ispol'zovaniye volnovoy teorii udara dlya opredeleniya nesushchey sposobnosti svay Ponomarev A.B. Using wave impact theory to determine the bearing capacity of piles] // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University / Construction and architecture. – Perm: PNIPU, 2019. – Vol. 10. - No. 3. – P. 35-43. [in Russian].
30. Popsuenko I.K., Pyatkovsky S.P., Bessmertny A.V. Interpretatsiya rezul'tatov ispytaniy zabivnykh trubchatykh svay s gruntovoy probkoy [Interpretation of Test Results of Driven Tubular Piles with a Soil Plug] // Bulletin of the Scientific Research Center "Construction". - Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Instrument Engineering, 2020. - No. 3 (26). – P. 64-73. [in Russian].
31. Mukhin A.A., Churkin A.A., Filippov K.A., Gavryutina A.V. K voprosu o primeneniі metoda ispytaniy svay dinamicheskoy nagruzkoy s ispol'zovaniyem printsipov volnovoy teorii udara [On the Application of the Method of Testing Piles with Dynamic Load Using the Principles of Wave Impact Theory] // International Scientific and Technical Journal / Geotechnics. – M.: OOO Geomarketing, 2020. – Vol. XII. – No. 2. – P. 70-87. [in Russian].
32. MSP 5.01-101-2003. Design and construction of pile foundations. – Astana: Committee for Construction, Housing and Public Utilities, MIT RK, 2007. – 146 p. [in Russian].
33. MGS (GOST 5686-12). Soils. Method of field testing with piles. – M.: Standartinform, 2014. – 42 p. [in Russian].
34. Narbut R.M. Rabota svay v glinistykh gruntakh [Performance of piles in clayey soils]. – Leningrad: Stroyizdat, 1972. – 160 p.
35. Bakholdin B.V. Energiya udara dizel'-molota pri pogruzhении svay [Impact Energy of a Diesel Hammer During Pile Driving] // Proceedings of the Gersevanov Research Institute of Instrument Making / Foundations, Foundations, and Underground Structures. – Moscow: Stroyizdat, 1977. – Issue No. 66. – P. 40-45. [in Russian].
36. Novozhilov G.F. Bezdefektnoye pogruzheniye svay v talykh i vechnomerzlykh gruntakh [Defect-Free Driving of Pile in Thawed and Permafrost Soils]. – Leningrad: Stroyizdat, 1987. – 111 p. [in Russian].
37. Abramov V.E. Dinamicheskoye vzaimodeystviye dizel'-molota i svai v protsesse yeye pogruzheniya v grunt [Dynamic Interaction of a Diesel Hammer and a Pile During Its Driving into the Soil] // Proceedings of the V All-Union Conference / Dynamics of Foundations, Foundations, and Underground Structures. – Moscow: N.M. Gersevanova, 1981. - Vol. 1. - P. 165-167. [in Russian].
38. Bekbasarov I.I. Opredeleniye energii udara dizel'-molota pri zabivke svay v grunty [Determination of the impact energy of a diesel hammer when driving piles into soils] // Scientific journal of PSU named after S. Toraighyrov / Science and technology of Kazakhstan. - Pavlodar, 2004. - No. 1. - P. 139-145. [in Russian].

39. Bekbasarov I.I. Opredeleniye vysoty pod'yema udarnoy chasti dizel'-molota pri pogruzhении svay [Determination of the lifting height of the striking part of a diesel hammer when driving piles] // Proceedings of the geotechnical conference dedicated to the Year of the Russian Federation in the Republic of Kazakhstan: "Geotechnical problems of construction of large-scale and unique objects". - Almaty, 2004. - P. 601-604. [in Russian].
40. Bad'in G.M. O koeffitsiyente v formule N.M. Gersevanova i metodike yego opredeleniya [On the coefficient in the formula of N.M. Gersevanov and the method of its determination]. - In the book: Bearing capacity of piles in soft soils. - Leningrad, 1966. - Part 2. - Pp. 67-69. [in Russian].
41. Bakholdin B.V., Ginzburg L.Ya. Ob empiricheskoy koeffitsiyente v dinamicheskoy formule professora N.M. Gersevanova i metodike yego opredeleniya [On the empirical coefficient in the dynamic formula of professor N.M. Gersevanov and the method of its determination] // Scientific works of NIIOSP. - Moscow: Stroyizdat, 1971. - Issue 61. - Pp. 135-138. [in Russian].
42. Fedorov V.I. K voprosu povysheniya tochnosti otsenki nesushchey sposobnosti svay, po rezul'tatam dinamicheskikh ispytaniy [On the issue of increasing the accuracy of assessing the bearing capacity of piles, based on the results of dynamic tests] // Abstracts of reports and communications of the All-Union conference: "Improving the technology of zero-cycle work using mechanization and automation." - Ufa, 1981. - Pp. 45-47. [in Russian].
43. Bekbasarov I.I. Rabota svai iz shlakoshchelochnogo betona v razlichnykh gruntovykh usloviyakh pri deystvii staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok [Performance of Slag-Alkali Concrete Piles in Various Soil Conditions under Static and Dynamic Loads]: Abstract of a Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. - Perm: PPI, 1983. - 22 p. [in Russian].
44. Savelyev I.V. Kurs fiziki [Physics Course]. - Moscow: Nauka, 1989. - 352 p. [in Russian].
45. Bekbasarov I.I., Atenov E.I., Shanshabaev N.A. Ob energoyemkosti zabivki shtampa i svay raznoy dliny pri ustroystve lentochnogo kombinirovannogo svaynogo fundamenta (issledovaniya na modelyakh) [On the Energy Intensity of Driving a Stamp and Piles of Different Lengths in the Construction of a Combined Strip Pile Foundation (Research on Models)] // Scientific Journal / Mechanics and Technology. – Taraz: NAO "Taraz University named after M.Kh. Dulati", 2024. - No. 2 (84). – P. 190-206. <https://doi.org/10.55956/ZBJU3224>. [in Russian].
46. Bekbasarov I.I., Atenov E.I., Shanshabaev N.A. Sposob dinamicheskogo ispytaniya kombinirovannogo svaynogo fundamenta [Method of dynamic testing of a combined pile foundation] / Patent of the Republic of Kazakhstan No. 9206 for utility model. - Astana: RSE NIIS, 2025. – Website: www.kazpatent.kz, section "State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan". [in Russian].
47. Bekbasarov I.I. Zabivnyye svaynyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy [Driven pile structures of buildings and structures]. – Almaty: "KEMEL KITAP", 2025. – 409 p. [in Russian].
48. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01. 83*. -M.: Russian Institute of Standardization, 2016. – 220 p. [in Russian].
49. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Nekotoryye voprosy teorii udara [Some issues of impact theory] // Naukovedenie. – M.: Institute Public Administration, Law and Innovation Technologies, 2013. - No. 5. - P. 1-15. [in Russian].
50. Solyanik-Krassa K.V. Vvedeniye v mekhaniku deformiruyemogo tverdogo tela [Introduction to the Mechanics of a Deformable Solid]. - Leningrad: Leningrad State University Publishing House, 1976. - 408. [in Russian].

51. Snitko N.K. Analiz amplitud kolebaniy pri zabivke svay i osadok poverkhnosti grunta [Analysis of Oscillation Amplitudes during Pile Driving and Soil Surface Settlement] // Interuniversity Thematic Collection of Papers / Soil Mechanics, Foundations and Foundations. - Leningrad: LISI, 1979. - P. 28-34. [in Russian].
52. Stepin P.A. Soprotivleniye materialov [Strength of Materials]: textbook / P.A. Stepin. - Moscow: Vysshaya shkola, 1983. - 303 p. [in Russian].
53. Manzhosov V.K. Modeli prodol'nogo udara [Longitudinal Impact Models]. - Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2006. - 160 p. [in Russian].
54. Bazhenov Yu.M. Beton pri dinamicheskom nagruzhении [Concrete under Dynamic Loading]. - Moscow: Stroyizdat, 1970. - 272 p. [in Russian].
55. Guide to the Production and Acceptance of Work in the Construction of Foundations and Bases. - Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Optical and Optical Structural Engineering, 1977. - 241 p. [in Russian].
56. Babanov V.V., Evseev N.A. Naznacheniyе zhestkostnykh parametrov zhelezobetonnykh konstruksiy v konechno-elementnykh dinamicheskikh raschetakh sooruzheniy [Assignment of Stiffness Parameters of Reinforced Concrete Structures in Finite Element Dynamic Calculations of Structures] // Scientific, Technical and Production Journal / Housing Construction. - Moscow, 2017. - No. 12. - P. 26-29. [in Russian].
57. Ruzanov P.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya betonov v dvumernoy postanovke [Mathematical Modeling of Dynamic Deformation and Fracture Processes of Concrete in a Two-Dimensional Statement: Dissertation for the Degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences]. Specialty: 01.02.04. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 1999. - 147 p. [in Russian].
58. Leshchinsky M.Yu. Ispytaniye betona [Concrete Testing]: Reference Manual. - M.: Stroyizdat, 1980. - 360 p. [in Russian].