

УДК 691.328.4

Экспериментально-аналитическая оценка возможности применения композитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сплошного сечения

А. В. Бенин¹, О. Ю. Беляев², Е. Р. Богданова¹, Р. Крист³, Ю. Ю. Курятников⁴

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ООО «Композит Групп Челябинск», Российская Федерация, 454047, Челябинск, ул. 2-я Павелецкая, 36, корп. 1

³Университет побережья, Колумбия, 080002, Барранкилья, 58-я улица, 55-66

⁴Тверской государственный технический университет, Российская Федерация, 170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22

Для цитирования: Бенин А. В., Беляев О. Ю., Богданова Е. Р., Крист Р., Курятников Ю. Ю. Экспериментально-аналитическая оценка возможности применения композитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сплошного сечения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 238–251. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-238-251

Аннотация

Цель: Рассмотреть возможность применения композитной арматуры в конструкции забивных свай квадратного сечения. **Методы:** Произведены аналитические и экспериментальные исследования влияния типа используемой в бетонных забивных сваях арматуры на прочность и жесткость при разгрузке. **Результаты:** В статье приведены результаты расчетов коэффициентов запаса кратковременной прочности бетонных забивных свай, армированных стеклопластиковой композитной арматурой, при их транспортировке. Установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации при вдавливании сваи. Представлены результаты опытной забивки свай, армированных композитной арматурой. **Практическая значимость:** Установлено, что сваи, армированные композитной арматурой, по своим свойствам не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой. Определен экономический эффект от замены традиционной металлической арматуры на композитную арматуру, выражающийся в снижении стоимости конечного продукта (свай).

Ключевые слова: Бетонные забивные сваи, композитная арматура, запас прочности, математическое моделирование, конечно-элементное моделирование, экспериментальные исследования, опытная забивка свай, экономический эффект.

Введение

Технология применения свай в грунтах при возведении зданий и сооружений с целью решения различных геотехнических задач известна с глубокой древности. На данный момент в практике строительства применяется более 150 типов свай, но наибольшее распространение получили забивные сваи сплошного квадратного сечения, применение

которых позволяет существенно сократить трудоемкость и стоимость, а также уменьшить сроки проведения строительных работ. Традиционно сваи армируются металлической арматурой, стоимость которой существенно влияет на стоимость конечного изделия (свай). Одним из способов уменьшения стоимости свай может быть замена металлической арматуры на композитную, напри-

мер стеклопластиковую полимерную арматуру (далее — СПА). Однако, учитывая, что отливка бетонных свай осуществляется на производстве, возникает необходимость транспортировки готового изделия на строительную площадку. Транспортировка бетонных свай увеличивает риск появления механических повреждений в готовом изделии, приводящих к зарождению трещин, сколов, обнажающих армирующий каркас. Замена металлической арматуры на композитную повышает деформативность свай, что увеличивает вероятность появления трещин при транспортировке, погрузо-разгрузочных работах и забивке свай. Наличие в бетонной свае различных дефектов будет способствовать ухудшению прочностных характеристик строительной конструкции [1].

В данной работе приводятся результаты определения напряженно-деформированного состояния свай, полученные на основе конечно-элементного решения линейных краевых задач в трехмерной постановке [2–5], экспериментальных исследований работы свай на трехточечный изгиб в лабораторных условиях, опытной забивки свай, армированных композитной арматурой на строительной площадке, а также оценки экономической эффективности замены металлической арматуры на СПА.

1. Объект исследований

В качестве объекта исследования была выбрана типовая бетонная забивная свая квадратного сплошного сечения. В исследованиях рассматривались два варианта армирования:

– тип I — стальной арматурой (типовая свая С40.20-3);



Рис. 1. Сваи железобетонные квадратного сечения. Изготовитель — акционерное общество «ТЖБИ-4» (фотография предоставлена автором)

Таблица 1. Параметры металлического арматурного каркаса

| Поз. | Наименование | Масса ед., кг | Кол-во | Примечание |
|------|-------------------------|---------------|--------|------------|
| | Свая С40.20-3 | | | |
| | Детали | | | |
| 1 | Стержень Ø10АIII L=3958 | 2,44 | 4 | 9,76 кг |
| 2 | Спираль Ø4 ВрI L=14198 | 1,31 | 1 | 1,31 кг |

– тип II — стеклопластиковой полимерной арматурой (СПА).

Бетонные сваи были отлиты на производстве АО «ТЖБИ-4» (г. Тверь) (рис. 1, 2). В табл. 1 приведены параметры металлической арматуры, использованной при изготовлении свай, класс бетона по прочности — В25.

Для армирования свай применялась стеклопластиковая арматура номинальным диаметром 10 мм, произведенная компанией ООО «Композит Групп Челябинск», которая является одним из крупнейших предприятий — изготовителей композитных строительных материалов в России.

Таблица 2. Физико-механические свойства материалов

| Параметр | Материал | | |
|---------------------------------------|----------|--------|-----------|
| | СПА | Металл | Бетон В25 |
| Модуль упругости, E , МПа | 55 | 210 | 30 |
| Коэффициент Пуассона, ν | 0,35 | 0,27 | 0,40 |
| Плотность, ρ , кг/м ³ | 2000 | 7800 | 2500 |

В табл. 2 приведены физико-механические свойства материалов, используемых в расчетах.

Расчетные сопротивления бетона R_b (при сжатии) и R_{bt} (при растяжении) для предельных состояний первой группы при классе бетона по прочности на сжатие В25 приняты соответственно 14,5 и 1,05 МПа, при расчете по вто-

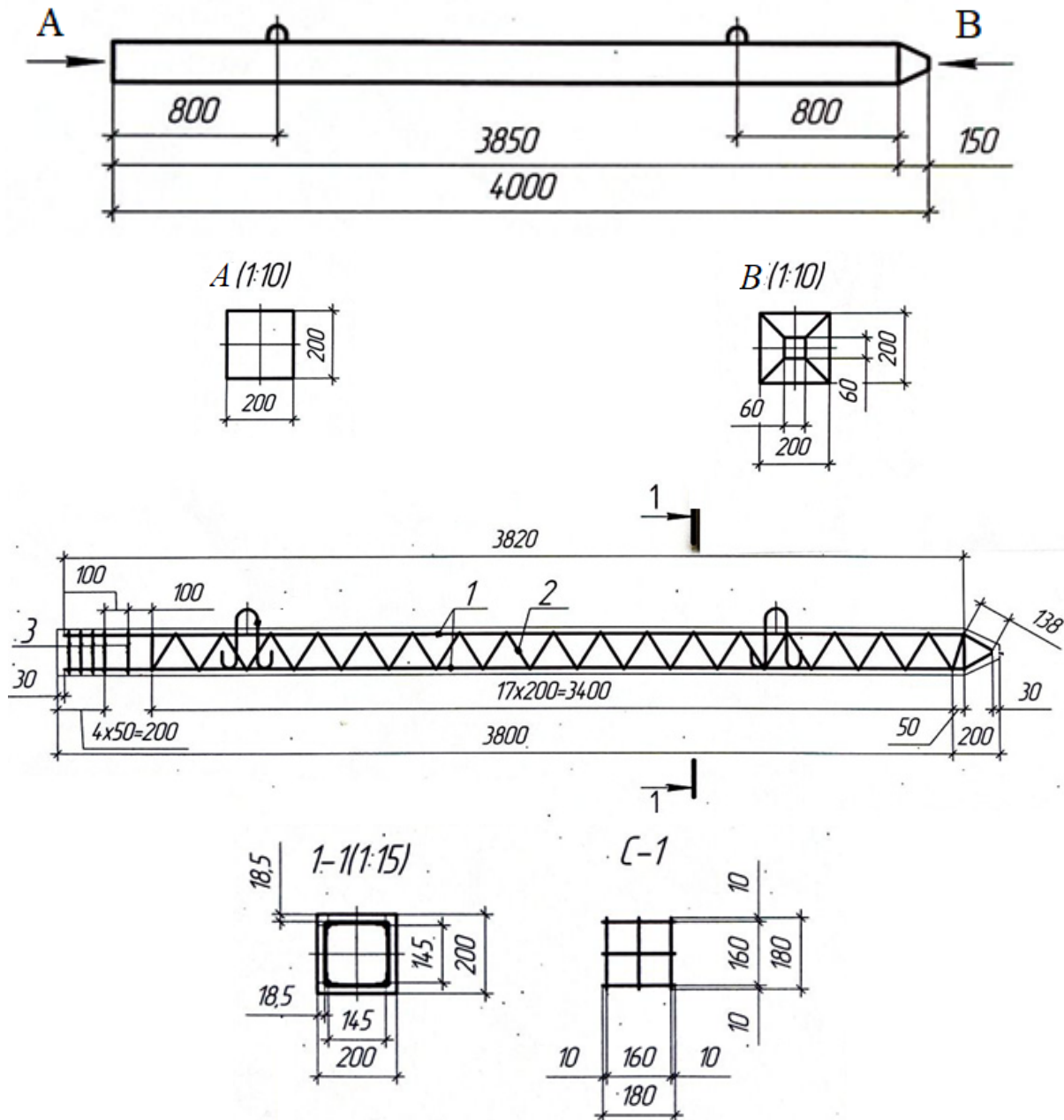


Рис. 2. Геометрические размеры и арматурный чертеж типовой бетонной сваи

рой группе предельных состояний — 18,5 и 1,55 МПа. При расчете по предельным состояниям первой группе принимается, что предельное состояние характеризуется достижением предельных усилий в бетоне растянутой зоны, определяемых в предположении упругой работы бетона.

2. Математическое моделирование и аналитические расчеты

Для выполнения расчетов использовался пакет конечно-элементного (КЭ) анализа ANSYS [6]. Задача решалась в трехмерной линейно упругой инфинитезимальной постановке с непосредственным учетом армирующих элементов. При моделировании использовались квадратичные изопараметрические КЭ SOLID186 для бетона, арматура моделировалась с помощью элементов REINF264. Всего КЭ модель содержит 4259 элементов и 14 534 узла (рис. 3, *а*, *б*). В качестве кинематических граничных условий задавался запрет вертикальных перемещений на узлах нижней грани сваи, расположенных на расстоянии 0,8 метра от краев призматического участка сваи (рис. 3, *в*).

2.1. Задача о транспортировке сваи: конечно-элементное моделирование

В качестве внешней нагрузки на сваю рассматривается гравитационное воздействие, то есть рассматривается изгиб двухопертой балки под действием только собственного веса. Потенциально возможные ударные нагрузки, несимметричные опирания при транспортировке сваи исключены.

Результаты конечно-элементного моделирования для сваи, армированной стеклопластиковой арматурой, представлены на рис. 4.

В табл. 3 приведены сравнительные результаты моделирования для всех рассмотренных случаев. Дополнительно рассмотрен случай бетонной сваи без армирования. Максимальные значения первого главного напряжения $\sigma_{1\max}$ в бетоне наблюдаются для забивной сваи без армирования (0,298 МПа), со СПА на 1,2 % меньше (0,294 МПа), еще на 3 % меньше у забивной сваи, армированной стальной арматурой (0,286 МПа).

С целью определения возможности сопротивления сваи дополнительным нагрузкам, возникающим при погрузо-разгрузочных работах, была рассмотрена задача о нагружении опертой сваи,

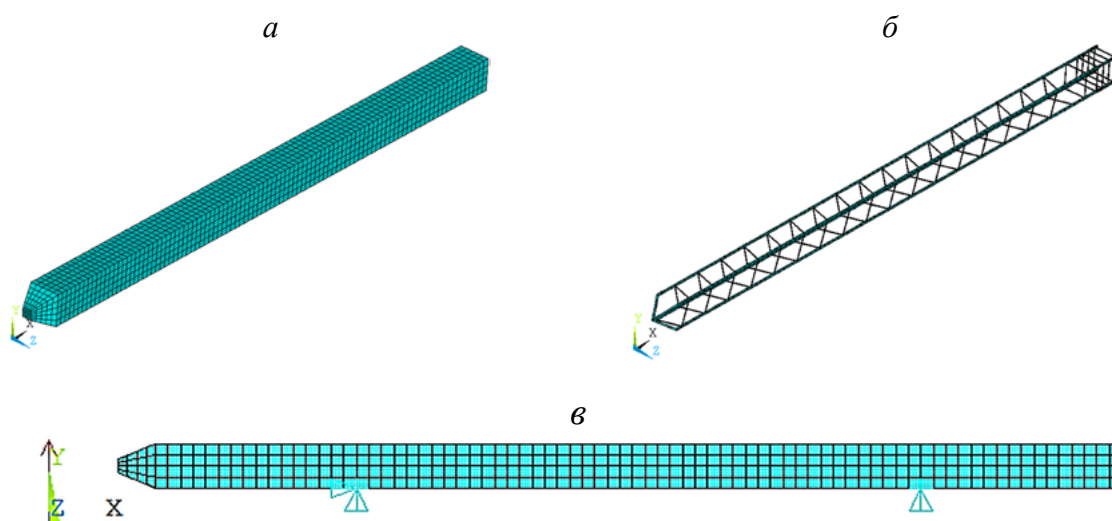


Рис. 3. Конечно-элементная модель армированной сваи:
а — бетонная свая; *б* — арматура; *в* — граничные условия

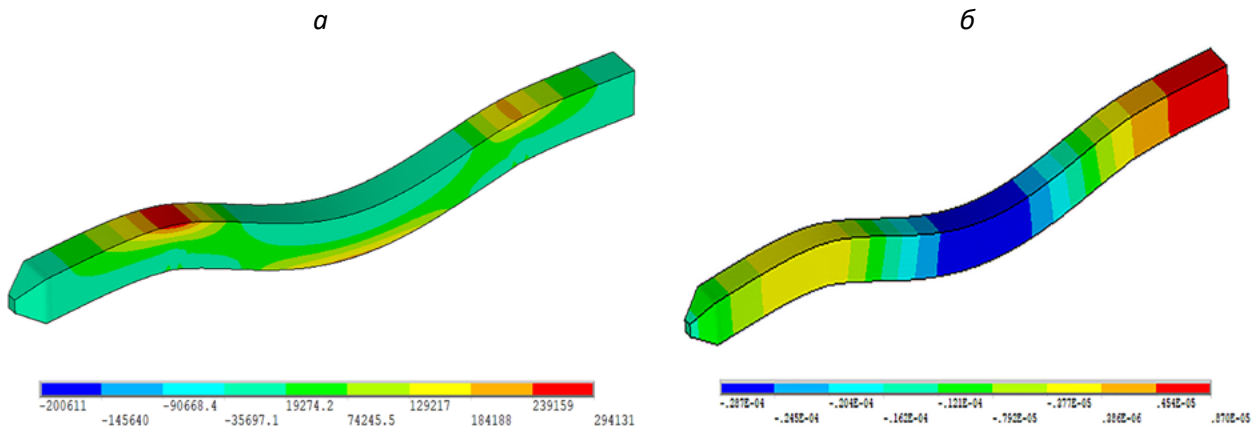


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние забивной сваи, армированной стеклопластиковой арматурой:
 а — поле первого главного значения тензора напряжений, Па;
 б — поле вертикальных перемещений, м

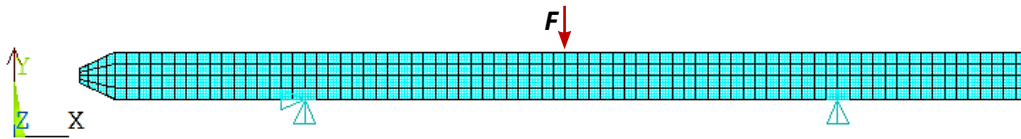


Рис. 5. Граничные условия при моделировании работы сваи при трехточечном изгибе

Таблица 3. Результаты конечно-элементного моделирования

| Показатель | Материал армирования | | |
|--|----------------------|--------|--------|
| | без армирования | металл | СПА |
| Максимальное значение первого главного напряжения, σ_{1max} , МПа | 0,298 | 0,286 | 0,294 |
| Максимальное по модулю вертикальное перемещение (прогиб), v , мм | 0,0291 | 0,0274 | 0,0286 |

армированной композитной арматурой, находящейся под действием собственного веса, дополнительной поперечной силой F , приложенной к середине сваи. Граничные условия представлены на рис. 5.

Установлено, что наибольшее значение приложенной силы, при котором максимальные показатели первого главного напряжения σ_{1max} не превышают расчетные сопротивления бетона при

растяжении $R_{bt} = 1,05$ МПа, составляет 278 кгс (2727 Н), что соответствует моменту образования первой трещины.

2.2. Учет динамических нагрузок, возникающих при транспортировке сваи

Учет динамического воздействия на сваю осуществлялся на основе введения коэффициента динамичности $\gamma = 1,6$, принятого согласно СП 295.1325800.2017. Максимальные показатели главного значения тензора напряжений с учетом динамических воздействий могут быть найдены путем умножения полученных в п. 2.1 напряжений на коэффициент динамичности и для забивной сваи без армирования составляют 0,477 МПа, со стеклопластиковой арматурой 0,470 МПа, армированной стальной арматурой 0,457 МПа. Во всех трех случаях напряжения не превышают расчетные сопротивления бетона при растяжении $R_{bt} = 1,05$ МПа, соответственно, рассмотренные варианты сваи проходят по первой группе предельных состояний.

2.3. Расчет свай, армированных композитной арматурой, по предельным состояниям второй группы

Согласно СП 295.1325800.2017 расчет бетонных конструкций, армированных полимерной композитной арматурой по предельным состояниям второй группы на образования трещин, производится из условия:

$$M > M_{crc}, \quad (1)$$

где M — изгибающий момент от внешней нагрузки относительно оси, нормальной к плоскости действия момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

M_{crc} — изгибающий момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента при образовании трещин, определяемый по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} \pm N e_x, \quad (2)$$

где $W_{pl} = 1,3 W_{red} = 1,3 \frac{I_{red}}{y_t}$ — упругий момент

сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения;

$I_{red} = I + I_a a$ — момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;

y_t — расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$a = E_a/E_b$ — коэффициент приведения арматуры к бетону;

I, I_a — моменты инерции сечений бетона и растянутой арматуры соответственно;

$e_x = W_{red}/A_{red}$ — расстояние от точки приложения продольной силы (расположенной в центре тяжести приведенного сечения элемента) до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется.

В выражении (3) знак «плюс» принимают при сжимающей продольной силе N , «минус» — при растягивающей силе.

Для рассматриваемой конструкции получается $M_{crc} = 3100$ Нм, что превосходит максимальный момент, полученный при конечно-элементном моделировании и с учетом коэффициента динамичности 1,6 составляющий 592 Нм. Соответственно, рассматриваемая конструкция удовлетворяет условию прочности по второй группе предельных состояний.

2.4. Задача о вдавливании сваи армированной композитной арматурой

2.4.1. Формулировка краевой задачи о вдавливании сваи

Рассматривалась задача о вдавливании сваи, армированной композитной арматурой, под действием силы, ориентированной под углом α к оси сваи (рис. 6). Определялась зависимость максимально допустимой нагрузки F , не приводящей к разрушению сваи от угла ее отклонения относительно оси сваи. На основании сваи задавалось закрепление по всем степеням свободы (жесткая заделка).

Equation Section 1

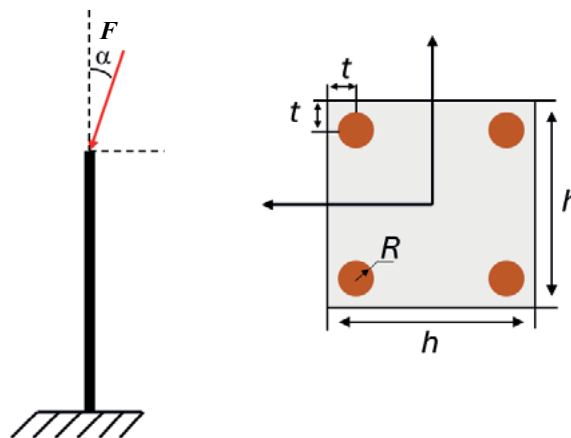


Рис. 6. Постановка задачи о вдавливании сваи

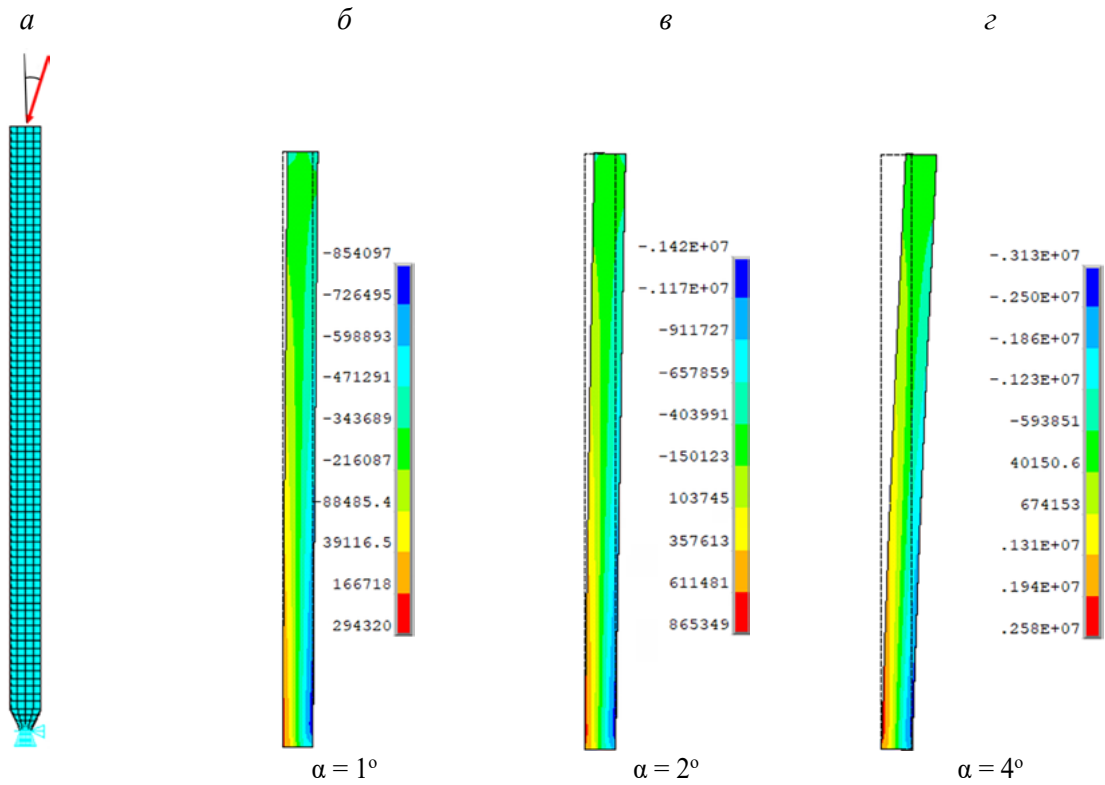


Рис. 7. Решение задачи о вдавлении сваи:

a — конечно-элементная постановка задачи; *б, в, з* — поля осевых напряжений для трех значений угла отклонения силы от оси сваи α .

Масштаб перемещений увеличен в 10 раз для наглядности

2.4.2. Результаты решения краевой задачи о вдавлении сваи

Задача решалась в двух постановках: аналитически на основе уравнений (3) — (7) и численно в конечно-элементном пакете ANSYS.

$$W_z = \frac{h^3}{6} + \frac{2\pi R^2 (h - 2t)^2}{h} \left(\frac{E_{арм}}{E_{бет}} - 1 \right). \quad (6)$$

Критическое значение силы может быть определено из соотношения:

$$\sigma = - \frac{F \sin \alpha (l_1 + l_2 + l_3 - x)}{I_z} \times y - \frac{F \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}}. \quad (3)$$

$$I_z = \frac{h^4}{12} + \pi R^2 (h - 2t)^2 \left(\frac{E_{арм}}{E_{бет}} - 1 \right). \quad (4)$$

$$\sigma_{\max, \min} = - \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} \pm \frac{Fl \sin \alpha}{W_z}. \quad (5)$$

$$F_{cr} = \min \left\{ R \left(- \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} + \frac{Fl \sin \alpha}{W_z} \right)^{-1}, R \left(- \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} - \frac{Fl \sin \alpha}{W_z} \right)^{-1} \right\}, \quad (7)$$

где $R = \begin{cases} R_b, \sigma < 0 \\ R_{bt}, \sigma > 0 \end{cases}$.

Конечно-элементная постановка задачи представлена на рис. 7, а, поля осевых напряжений для трех значений угла отклонения при нагружении силой 10 кН от оси сваи представлены на рис. 7, б–г.

Установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации (рис. 8). Так, при отклонении оси приложения силы от вертикали в один градус значение критической силы падает в 12 раз по сравнению к случаю силы, приложенной вдоль оси сваи. Данный факт объясняется возникновением изгибающих нагрузок, которые, в свою очередь, приводят к возникновению области растяжения и ввиду разной сопротивляемости бетона к растяжению и сжатию приводят к резкому снижению допускаемых напряжений.

3. Экспериментальные исследования несущей способности свай

С целью верификации полученных результатов аналитических и конечно-элементных расчетов выполнены экспериментальные исследования несущей способности свай при трехточечном

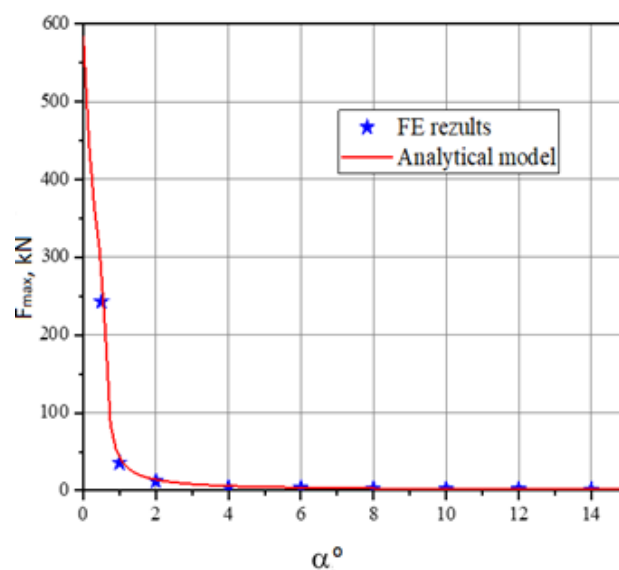


Рис. 8. Зависимость максимально допустимой силы от ее отклонения от оси сваи

изгибе. Были испытаны сваи с композитным и стальным армированием. На рис. 9 представлен испытательный стенд, а в табл. 4 приведены результаты испытаний.

Установлено, что главными отличиями работы свай с композитным армированием от свай с металлическим каркасом являются:



Рис. 9. Стенд для испытаний свай на трехточечный изгиб

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований на трехточечный изгиб свай

| Степень нагружения | Нагрузка, F , кН | | | Прогиб, v , мм | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Образец № 1. Композитная | Образец № 2. Композитная | Образец № 3. Стальная | Образец № 1. Композитная | Образец № 2. Композитная | Образец № 3. Стальная |
| 1 | 3,80 | 3,52 | 3,80 | 0,83 | 0,88 | 0,45 |
| 2 | 7,60 | 7,20 | 7,20 | 1,95 | 2,09 | 0,97 |
| 3 | 10,82 | 9,89 | 11,47 | 3,70 | 3,87 | 1,99 |
| 4 | — | — | 15,23 | — | — | 3,11 |
| 5 | — | — | 19,25 | — | — | 4,61 |
| 6 | — | — | 22,50 | — | — | 6,77 |
| 7 | — | — | 25,20 | — | — | 8,12 |

| Степень нагружения | Трещины | | |
|--------------------|--|--|---|
| | Образец № 1. Композитная | Образец № 2. Композитная | Образец № 3. Стальная |
| 1 | Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм | Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм | Мелкие трещины (5 шт.), равномерно распределенные между опорами. Длина трещин 1/3 от высоты сечения |
| 2 | Дальнейшее раскрытие центральной трещины до 0,20–0,25 мм. Новая трещина длиной 2/3 сечения, раскрытие до 0,15 мм | Раскрытие центральной трещины до 0,30 мм. Несколько новых трещин слева и справа от центрального сечения длиной 2/3 высоты сечения. Раскрытие до 0,10–0,15 мм | Рост трещин до 1/2 высоты сечения, раскрытие центральных трещин до 0,15 мм |
| 3 | Раскрытие 1-й и 2-й трещин до 0,5–0,7 мм. Падение нагрузки до 7,75 кН. Потеря несущей способности | Появление новых трещин. Раскрытие центральной трещины до 0,45–0,50 мм. Падение нагрузки до 8,8 кН. Потеря несущей способности | Центральная трещина выросла до 2/3 высоты сечения. Ширина раскрытия 0,15–0,20 мм |
| 4 | — | — | Незначительный прирост трещин по длине (15–20 мм). Максимальная ширина раскрытия 0,20–0,25 мм |
| 5 | — | — | Дальнейший рост трещин. Максимальное раскрытие 0,3–0,4 мм |
| 6 | — | — | Максимальное раскрытие 0,5–0,7 мм |
| 7 | — | — | Потеря несущей способности |

1) пониженные прочностные характеристики свай в целом (по потере несущей способности в 2,4 раза);

2) появление трещин уже при начальной стадии нагружения в центральном сечении на всю высоту поперечного сечения, причинами которых являются бóльшая изгибная дефор-

мативность свай с СПА, а также применение в конструкции арматурного каркаса полимерных хомутов.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 10, а верификация полученных расчетными методами результатов с экспериментальными данными для свай, армированных

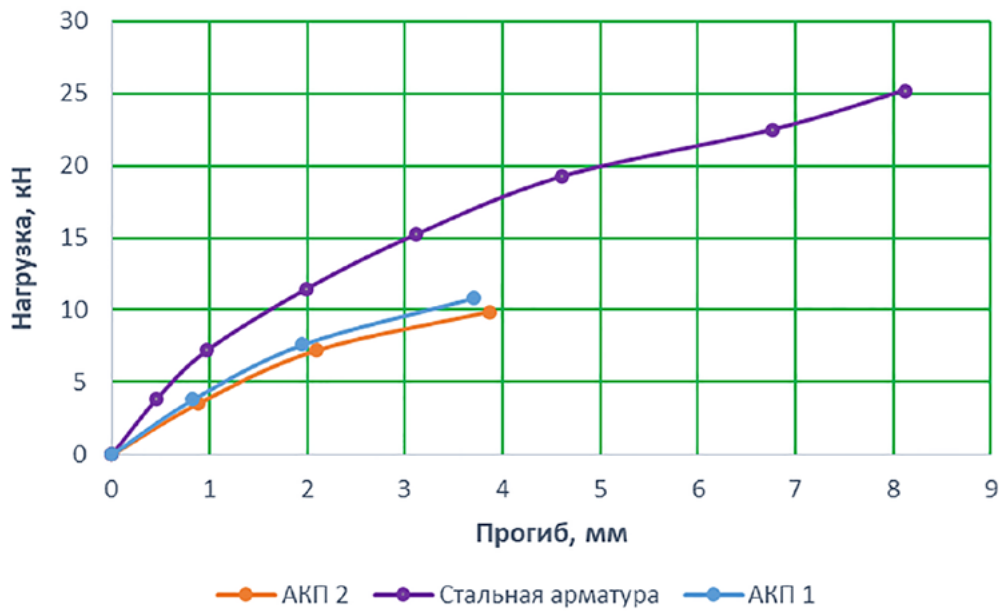


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований свай, армированных металлической арматурой и СПА, на трехточечный изгиб

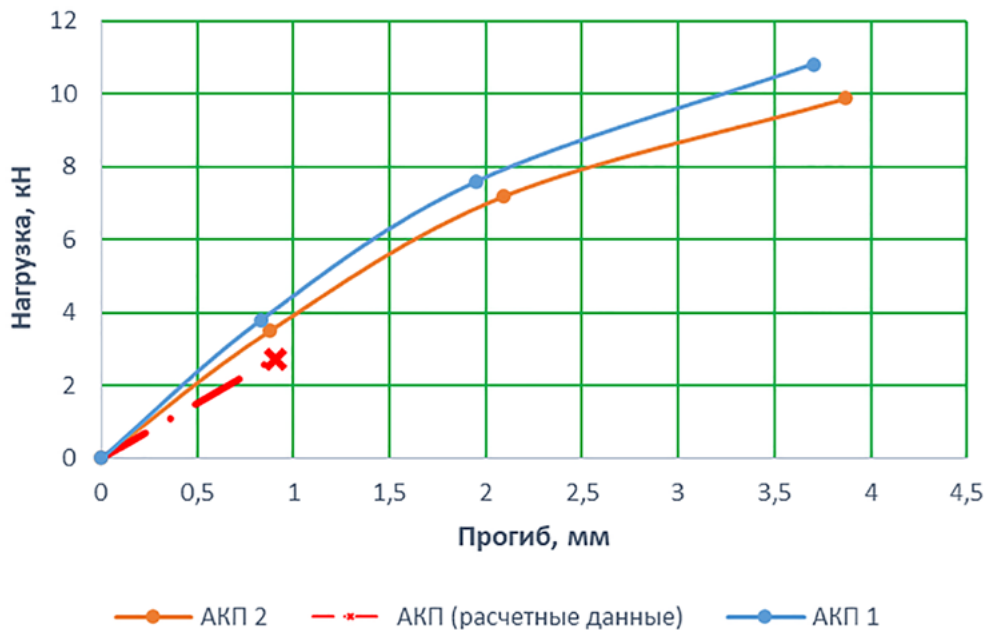


Рис. 11. Верификация результатов экспериментальных исследований свай, армированных СПА, на трехточечный изгиб с результатами численного моделирования

СПА, приведена на рис. 11. Выявлено, что значения нагрузок, при которых появляется первая трещина, при экспериментальных исследованиях (3,66 кН) в 1,34 раза выше значений, полученных

при численном моделировании (2,73 кН), что прежде всего связано с тем, что реальная прочность бетона свай на сжатие выше планового класса прочности В25.



Рис. 12. Опытная забивка свай, армированных СПА, на строительной площадке (фотографии предоставлены автором)

4. Результаты опытного применения свай, армированных СПА

С целью опытной апробации возможности применения СПА для армирования свай была выполнена опытная забивка свай на реальной строительной площадке (рис. 12).

В результате опытной забивки установлено, что сваи, армированные СПА, не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой, трещин при транспортировке свай, установке и забивки их в проектное положение не обнаружено.

5. Оценка экономической эффективности замены металлической арматуры на композитную при производстве забивных свай квадратного сплошного сечения

Выполнена экономическая оценка стоимости двух типов забивных свай квадратного сплошного сечения, армированных различными видами арматуры.

Установлено, что при использовании композитной арматуры стоимость свай уменьшается на 12 % по сравнению с традиционной металлической арматурой (расчет произведен в ценах

2024 года), при этом наибольшие затраты на каркас (до 50 %) приходится на композитные хомуты, стоимость которых может быть существенно снижена при их оптовой закупке.

Заключение

1. Выполнен анализ влияния типа используемой арматуры в конструкции забивных свай квадратного сплошного сечения на напряженно-деформированное состояние бетонной сваи при ее транспортировке и погрузо-разгрузочных работах. При проведении расчетов оценки прочности рассмотрено два варианта армирования: стальная арматура и стеклопластиковая арматура. Для всех рассматриваемых вариантов свай значения максимальных главных напряжений не превосходят 0,3 МПа, что дает более чем трехкратный запас прочности по сравнению с пределом прочности бетона марки В25. Даже при рассмотрении коэффициента динамичности, равного 1,6, выполняется условие обеспечения прочности армированной сваи. Таким образом, выбор вида армирующего материала (сталь или СПА) не оказывает значительного влияния на максимальные напряжения в бетоне. Отличие в максимальных главных напряжениях в бетоне для забивной сваи, армированной стеклопластиковой арматурой и стальной арматурой, не превышает 3 %. Валидация модели выполнена путем сравнения полученных результатов с результатами экспериментальных исследований при трехточечном изгибе сваи.

2. В задаче о вдавливании сваи, армированной СПА, установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации. При разориентации в один градус значение критической силы падает в 12 раз по сравнению с случаем силы, приложенной вдоль оси сваи.

3. В результате опытной забивки установлено, что сваи, армированные СПА, не отличаются от свай, армированных традиционной металличе-

ской арматурой, трещин при транспортировке свай, установке и забивки их в проектное положение не обнаружено.

4. Определен экономический эффект от замены традиционной металлической арматурой на композитную арматуру, выражающийся в снижении стоимости конечного продукта (сваи) на 12 % и который может быть значительно увеличен за счет снижения стоимости композитных хомутов, применяемых при изготовлении арматурного каркаса.

Список источников

1. Дедков В. И. Исследование влияния технологических и монтажных факторов на долговечность забивных свай в агрессивных грунтовых средах / В. И. Дедков // Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах: тез. докл. науч.-техн. семинара. — 1987. — С. 56–57.

2. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 5(40). — С. 86–99.

3. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 1(45). — С. 23–40.

4. Renić T. Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars / T. Renić, T. Kišiček // Buildings. — 2021. — Vol. 11. — P. 424.

5. Sharabi M. N. Numerical modeling of reinforced-concrete bond / M. N. Sharabi // Nuclear Engineering and Design. — 1986. — Vol. 91. — Pp. 207–216.

6. ANSYS. Academic Research, Release 15.0.

Дата поступления: 31.01.2025

Решение о публикации: 27.02.2025

Контактная информация:

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», начальник научно-исследовательской части; benin@pgups.ru

БЕЛЯЕВ Олег Юрьевич — директор; Belyi25@ya.ru

БОГДАНОВА Екатерина Романовна — инженер отдела реализации научно-технических программ, ассистент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций»; univer006@mail.ru

КРИСТ Роберто — д-р техн. наук, профессор, кафедра «Гражданское строительство

и охрана окружающей среды»; rchrist@unisinob.br

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич — канд. техн. наук,

доцент кафедры «Производство строительных изделий и конструкций», руководитель службы качества

ТЖБИ-4; yuriy-k@yandex.ru

Experimental and Analytical Assessment of Use of Composite Rebars for Reinforcing Driven Piles with Solid Square Cross-Section

A. V. Benin¹, O. Yu. Beliaev², E. R. Bogdanova¹, R. Christ³, Yu. Yu. Kuryatnikov⁴

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Composite Group Chelyabinsk LLC, 36, building 1, 2-ya Paveletskaya Str., Chelyabinsk, 454047, Russian Federation

³Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Calle 58, 55-66, Barranquilla 080002, Colombia

⁴Tver State Technical University, 22 Nikitin Embankment, Tver, 170026, Russian Federation

For citation: Benin A. V., Beliaev O. Yu., Bogdanova E. R., Christ R., Kuryatnikov Yu. Yu. Experimental and Analytical Assessment of Use of Composite Rebars for Reinforcing Driven Piles of Solid Square Cross-Section // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 238–251. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-238-251

Summary

Purpose: To consider the possibility of using composite rebars in the construction of square-section driven piles. **Methods:** Analytical and experimental studies have been carried out on how the type of rebars used in concrete driven piles affect strength and rigidity in the process of unloading. **Results:** The article presents the results of calculations of the short-term strength reserve coefficients of concrete driven piles reinforced with fiberglass composite rebars during their transportation. A strong dependence of the maximum allowable force value on its orientation during pile indentation has been established. The results of experimental driving of piles reinforced with composite rebars are presented. **Practical significance:** It has been established that piles reinforced with composite rebars do not differ in their properties from those reinforced with traditional metal armature. The economic effect of replacing traditional metal reinforcement with composite rebars reflected in the cost reduction of the final product (piles) has been determined.

Keywords: Concrete driven piles, composite rebars, safety margin, mathematical modelling, finite element modelling, experimental research, experimental pile driving, economic effect.

References

1. Dedkov V. I. Issledovanie vliyaniya tehnologicheskikh i montajnih faktorov na dolgovechnost zabivnih svai v agressivnykh gruntovykh sredakh [Investigation of the influence of technological and installation factors on the durability of driven piles in aggressive ground environments]. *Povyshenie dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksiy v agressivnykh sredakh: tez. dokl. nauch.-tekhn. seminar* [Increasing the durability of building structures in aggressive environments: report summary of the scientific and technical seminar]. 1987, pp. 56–57 p. (In Russian)

2. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. et al. Matematicheskoe modelirovanie processa razrusheniya scepneniya armaturi s betonom. Chast' 1. Modeli s uchedom nesploshnosti soedineniya [Mathematical modeling of the process of fracture of reinforcement adhesion to concrete. Part 1. Models taking into account the discontinuity of the connection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal]. 2013, Iss. 5(40), pp. 86–99. (In Russian)

3. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. et al. Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast' 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soedineniya [Mathematical modeling of the process of fracture of reinforcement adhesion to concrete. Part 2. Models taking into account the discontinuity of the connection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal]. 2014, Iss. 1(45), pp. 23–40. (In Russian)

4. Renić T., Kišiček T. Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars. *Buildings*, 2021, vol. 11, pp. 424.

5. Sharabi M. N. Numerical modeling of reinforced-concrete bond. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, vol. 91, pp. 207–216.

6. ANSYS. Academic Research, Release 15.0.

Received: January 31, 2025

Accepted: February 27, 2025

Author's information:

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Mechanics and Strength of Materials and Structures”, Head of the Research Department; benin@pgups.ru

Oleg Yu. BELIAEV — Director; Belyi25@ya.ru

Ekaterina R. BOGDANOVA — Engineer, Department for the implementation of scientific and technical programmes, Assistant of the Department “Mechanics and Strength of Materials and Structures”; univer006@mail.ru

Roberto CHRIST — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Civil and Environmental; rchrist@unisinis.br

Yuriy Yu. KURYATNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Production of Building Products and Structures”, Head of the Quality Service TzhBI- 4; yuriy-k@yandex.ru