

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 624.154:624.131.22

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И ВЫБОР  
ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ СХЕМЫ РАБОТЫ СВАЙ  
В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,

МОТОРНИЙ А. Н.<sup>2</sup>, маг.,

МОТОРНИЙ Н. А.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

<sup>3</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

**Аннотация.** Рассмотрены и проанализированы существующие расчетные схемы работы свай в глинистых грунтах. Ленинградская школа, в которой за основу формирования несущей способности сваи принимается тиксотропное упрочнение глинистых грунтов и радиальное уплотнение грунта вокруг ствола сваи в процессе забивки сваи сваебойным агрегатом и за период эксплуатации. Одесская школа, в которой за основу формирования несущей способности сваи принимается формирование выпора грунта из-под острия сваи в процессе погружения сваи сваебойным агрегатом, формирование уплотненной зоны (платформы) в плоскости острия свай, формирование щели вокруг ствола сваи в процессе ее погружения за счет перемещения выпираемого грунта вместе с острием сваи. Предпосылки формирования несущей способности сваи за счет тиксотропного упрочнения грунта во времени и радиального уплотнения грунта вокруг ствола сваи не могут дать ответа на следующие вопросы: 1) Почему в процессе погружения сваи формируется щель вокруг ствола погружаемой сваи, когда, по предпосылкам, происходит радиальное уплотнение грунта вокруг ствола? 2) Почему в межсвайном пространстве формируется лунка (прогиб), а не выгиб грунтового массива (за счет радиального уплотнения? 3) За счет чего формируется расчетное сопротивление грунта под нижним концом (острием) сваи, которое примерно в 10 раз превышает расчетное сопротивление грунта в плоскости острия, согласно ДБН.В.2.1-10.-2009?

На все эти и другие технические и технологические вопросы дают обоснованные ответы предпосылки Одесской школы с дополнениями и развитиями, выполненными авторами.

**Ключевые слова:** *выпор грунта из-под острия сваи; формирование уплотненной платформы; образование (формирование) щели вокруг ствола сваи; осадка подстилающего платформы слоя; провальные деформации межсвайного пространства*

**АНАЛІЗ ДІЮЧИХ РОЗРАХУНКОВИХ СХЕМ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ  
РІШЕНЬ СХЕМИ РОБОТИ ПАЛЬ  
У ГЛИНИСТИХ ГРУНТАХ**

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,

МОТОРНИЙ А. М.<sup>2</sup>, маг.,

МОТОРНИЙ М. А.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

<sup>3</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

**Анотація.** Розглянуто і проаналізовано існуючі розрахункові схеми роботи паль у глинистих ґрунтах. Ленінградська школа, в якій за основу формування несної здатності палі приймається зміцнення глинистих ґрунтів і радіальне ущільнення ґрунту навколо стовбура палі в процесі її забивання палебійним агрегатом і за період експлуатації. Одеська школа, в якій за основу формування несної здатності палі приймається формування випору ґрунту з-під вістря палі, в процесі занурення палі палебійним агрегатом, формування ущільненої зони (платформи) в площині вістря палі, формування переміщення ґрунту навколо вістря разом із вістря палі. Припущення формування несучої здатності палі за рахунок тиксотропного зміцнення ґрунту за період часу і радіального ущільнення ґрунту навколо стовбура палі не можуть дати відповіді на такі запитання: 1) Чому в процесі занурення палі формується щілина навколо стовбура занурюваної палі, тоді як, за припущенням Ленінградської школи, відбувається радіальне ущільнення ґрунту навколо нього? 2) Чому в міжпалевому просторі формується лунка (вигин), а не прогин ґрунтового масиву за рахунок радіального ущільнення ґрунту навколо стовбура палі? 3) За рахунок чого формується розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палі, який приблизно в десять разів перевищує розрахунковий опір ґрунту в площині нижнього кінця палі, розрахованого за формулою ДБН.В.2.1-10-2009?

На всі ці й інші технічні і технологічні питання дає обґрунтовану відповідь припущення Одеської школи з доповненнями і розширеннями, виконаними авторами цієї статті.

**Ключові слова:** *випір ґрунту з-під вістря палі; формування ущільненої платформи; утворення щілини навколо стовбура палі; шару; що підстилює платформу; провальні деформації ґрунту в міжпалевому просторі*

## ANALYSIS OF EXISTING SCHEMES AND THE OPTIMIZING SETTLEMENT CHOIS OF PILES WORK SCHEMES IN CLAY SOILS

BOLSHAKOV V. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc., Prof.*,

MOTORNYI A. N.<sup>2</sup>, *master*,

MOTORNYI N. A.<sup>3</sup>, *PhD., Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Establishment «Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Educational Establishment «Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

<sup>3</sup> Department of Basements and Foundations, State Higher Educational Establishment «Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

**Summary.** It were considered and analyzed the existing schemes of piles work in clay soils. 1. Leningrad scientific school, where the formation of pile bearing capacity use as the basis of the thixotropic clay soils hardening and radial soil pressing around the pile shaft during the piles driving with pile-driving equipment for the exploitation period. 2. Odessa scientific school, in which the uplift soil formation from the edge pile use as the basis of the pile bearing capacity during the piles driving, the formation of the pressed zones (platform) in the piles edge plane, the gap formation around the pile shaft during its diving by ground pushed moving with the pile edge. 3. Preconditions of the pile bearing capacity formation of the pile by the thixotropic soil hardening in time and the radial soil pressing around the pile shaft can not give an answer to the following questions: 1) Why during the pile driving is formed the gap around the trunk of dived piles, when by condition there is a radial soil hardening around the trunk? 2) Why in the inter-piled space is formed the lune (deflection), not the soil mass swelling (due to the radial hardening)? 3) By what is formed the calculated soil resistance under the lower end (edge) of the pile? which is about 10 times higher than the calculated soil resistance in the edge plane, according to the Building Code V.2.1-10. 2009?

The justified answers on all these and other technical and technological matters give perquisites of the Odessa scientific school with additions and authors developments.

**Keywords:** *soil uplift from the edge pile; pressed platform formation; gap formation around the pile shaft; underlayer platform settlement; failing deformations of the inter-piled space*

В настоящее время существуют два основных направления по работе забивных железобетонных свай в глинистых ґрунтах: Первое – Ленинградской школы во главе с Р. Нарбутом [1] и поддерживающих данное направление В. Зурнаджи, А. Мустафаев

[5; 6]. Е. Иванов и др. подтверждают, что при забивке свай происходит уплотнение ґрунта в радиальном направлении вокруг ствола свай, где проявляются четыре зоны деформации: 1-я – тонкая пленка толщиной 0,5÷3 мм; 2-я – переуплотненный ґрунт –

толщиной  $0,8 \div 2$  см. ( $\rho_d > 1,8$  т/м<sup>3</sup>), причем контакт ствола сваи по грунту осуществляется не по бетонной поверхности сваи, а по первой уплотненной зоне – пленке, и второй уплотненной зоне, т.е. грунт по грунту.

Возникает вопрос: а как можно в процессе забивки сваи сваебойным агрегатом определить толщину первой уплотненной зоны толщиной  $\Delta t = 0,5 - 0,8$  мм? По срезам? Если это предположение, то под него не существует доказательств. А если и существует (в литературных источниках его нет), то может относиться только к ленточным глинам ледникового происхождения, о чем трактует Р. Нарбут [1, с. 79] относительно увеличения сопротивления свай во времени. По предположению Р. Нарбута, увеличение сопротивления свай во времени происходит за счет тиксотропного упрочнения грунта как на боковой поверхности, так и под острием (тоже может быть частично применено к тем же ледниковым отложениям – ленточным глинам и илистым грунтам).

Коллектив ученых 1960–1970 годов (В. Зурнаджи, А. Мустафаев, Е. Иванов и др.) поддержали предпосылки Р. Нарбута, так как эти предпосылки являлись не основным направлением их научной деятельности:

В. П. Афанасьев, В. А. Зурнаджи, А. А. Мустафаев, их ученики и последователи А. Алиев, В. Крижановский и др. занимались разработкой теоретических основ строительства зданий и сооружений на просадочных грунтах Северного Кавказа. Такими же вопросами в Украине занимались:

А. М. Дранников, С. Г. Грутман, С. Н. Клепиков, К. А. Кныш, П. А. Гагарин, И. М. Литвинов и его ученики и последователи. Поэтому в учебной и научной литературе того периода проскальзывают трактовки о радиальном упрочнении и уплотнении грунта вокруг ствола сваи при забивке ее сваебойным агрегатом.

Но по указанным предпосылкам невозможно объяснить следующие явления:

1) Почему вокруг ствола сваи в процессе забивки образуется щель и как это согласуется с радиальным уплотнением грунта вокруг ствола сваи? 2) Почему в процессе забивки свай и их эксплуатации на поверхности межсвайного пространства образуется лунка – понижение поверхности в межсвайном пространстве, что, в свою очередь, противоречит утверждению некоторых исследователей о совместной работе ростверка с основанием.

На эти и другие технологические вопросы дает ответ сначала гипотеза, а потом подтвержденная на практике и внедренная в нормативные документы (СНиП II 17-77 и СНиП 2.02.03-85, СНиП II Б.5-67, и действующий сегодня в Украине ДБН В.2. I-10-2009), трактовка кафедры оснований и фундаментов Одесского инженерно-строительного института (ОИСИ) под руководством зав. кафедры В. Н. Голубкова и нашедшая дальнейшее развитие в исследованиях авторов данной статьи.

Суть трактовки заключается в следующем: при погружении сваи сваебойным агрегатом или вертикальной вдавливающей нагрузкой радиального уплотнения грунта вокруг ствола сваи не происходит. Грунт в процессе передачи на сваю ударной (импульсной) или вдавливающей (статической) нагрузки выдавливается из-под острия сваи и, в связи с прижатием грунта к поверхности острия сваи, силы которого значительно превышают силы трения грунта на боковую поверхность сваи, перемещается вместе с острием (как нарастающий ком) сваи и распространяется под углом  $\alpha = \varphi_{cp}/4$  к вертикальной оси сваи. Это формирует основание условного фундамента с размерами  $l_{y\phi} = l_{cv} \cdot tq\phi/4 + d_{cv}$ ;  $e_{y\phi} = l_{cv} \cdot tq\phi/4 + d_{cv}$ ;  $A_{y\phi} = l_{y\phi} \cdot e_{y\phi} = (l \cdot tq\phi/4 + d_{cv})^2$  – для одиночной сваи, и  $l_{y\phi} = l_p - 2d_{cv} + 2l_{cv} \cdot tq\phi/4$ ;  $e_{y\phi} = e_p - 2d_{cv} + 2l_{cv} \cdot tq\phi/4$  для куста свай и используется при расчете осадки свайных фундаментов (методика узаконена СНиП и ДБН.).

Развивая трактовку ОИСИ о формировании условного фундамента в плоскости острия сваи, авторы в

предыдущих статьях [12] показали формирование щели вокруг ствола сваи при ее погружении, что снижает сопротивление сваи по боковой поверхности при ее погружении и облегчает погружение сваи в грунт. Кроме того, при передаче на сваю вертикальной нагрузки, ударной – импульсной или статической) под острием сваи возникают большие контактные напряжения, во много раз превышающие расчетное сопротивление грунта под острием сваи. В результате передачи такого напряжения на грунт под острием проявляется выпор грунта из-под острия и острие сваи перемещается вниз по направлению действия ударной или статической вдавливающей нагрузки. На выпираемый из-под острия сваи грунт действует вертикальная нагрузка от собственного веса грунта  $P = \gamma \cdot z$  и горизонтальная  $P_2 = \gamma \cdot z \cdot tq^2(45-\varphi/2) - 2Ctq(45-\varphi/2)$ , с суммарным значением пригрузки.

$$P_{\Sigma} = tq(45-\varphi/2) \cdot \sqrt{(y \cdot z - c)^2 + y \cdot z \cdot c}.$$

Выпираемый из-под острия сваи грунт перемещается за счет передачи на грунт под острием сваи контактного давления  $P_k$  и сопротивления трению грунта на боковую поверхность ствола сваи  $P_f = f \cdot A$ . Общая нагрузка, действующая на грунт под острием,  $P = P_k - P_f$ .

Выпирание грунта из-под острия сваи будет продолжаться до выполнения условия равновесия, т. е:

$$P_k - P_f \leq P_{\Sigma}. \quad (1)$$

После выполнения данного условия равновесия выпор грунта из-под острия сваи гасится пригрузкой  $P = P_{\Sigma}$ ,

где  $P$  – общая нагрузка, передаваемая на слой грунта под острием сваи;

$P_{\Sigma}$  – нагрузка, передаваемая на выпирающийся из-под острия грунт;

Так как  $P$  с определенной глубины для котлована остается постоянной, а  $P$  возрастает пропорционально глубине ( $z$ ), то выпирающийся грунт из-под острия сваи будет уплотняться направленным под углом  $\alpha$ ;  $tq$  стремиться к  $tq^2(45-\varphi/2)$ ;  $tq$  для песков ( $c=0$ )  $tq\alpha = tq^2(45-\varphi/2)$  к стволу сваи пригрузкой  $P$  (выпирающийся грунт как бы будет силой  $P$  принудительно

возвращаться в свое исходное положение, что заставляет выпирающийся грунт из-под острия сваи уплотняться вокруг острия и ствола в приостриенной зоне. Сила прижатия выпираемого грунта к поверхности острия и приостриенной зоне намного больше силы трения грунта на боковой поверхности острия сваи и приостриенной зоне, поэтому уплотненный грунт вокруг острия перемещается вместе с острием, что приводит к формированию уплотненной зоны в плоскости острия сваи толщиной  $h = lcv \cdot tq\varphi_{cp}/4$ .

По данным исследований кафедры оснований и фундаментов ОИСИ, уплотненное ядро под острием распространяется под углом  $\alpha = \varphi/4$ . Сформированная в плоскости острия свай уплотненная платформа (зона) формирует расчетное сопротивление грунта в плоскости острия свай  $R_o$ , которое примерно в 8–10 раз превышает расчетное сопротивление  $R$  на глубине острия свай, определяемое по формуле ДБН В.2.1-10-2009 с использованием решения Н. Г. Пузыревского.

В связи с этим перемещением грунта вместе с острием сваи и формированием уплотненной платформы в плоскости острия сваи вокруг ствола сваи формируется «щель» под тем же углом  $\alpha = \varphi_{cp}/4$  относительно ствола сваи, что в конечном (счете) итоге снижает сопротивление погружению сваи в грунт при забивке ее сваебойным агрегатом.

В связи с уплотнением грунта в плоскости острия понижается влажность уплотненной (платформы) зоны, грунт практически всегда находится в твердом состоянии, а влажность грунта платформы может повисить и изменить консистенцию грунта платформы, только в том случае, когда напорный градиент «I» превысит усилия, при котором уплотнялся грунт в сформированной платформе, что в конечном счете невозможно.

Отсюда следует, что, если придерживаться гипотезы выпора грунта из-под острия сваи и его уплотнения пригрузкой  $P$ , то выходит, что

уплотненный грунт в сформированной уплотненной платформе всегда находится в твердом состоянии и таблица Н.2.1 ДБН В.2.1.10-2009 частично (а может быть, и полностью) теряет свое назначение для глинистых грунтов. В таблице остаются востребованными только колонки, касающиеся песчаных грунтов средней плотности, и колонка для  $I_L \leq 0$  для глинистых грунтов. Поэтому указанная таблица, по всей вероятности, требует реконструкции. По всей видимости, при реконструкции для обоснования значений расчетного сопротивления грунта  $R$  под нижним концом сваи следует включить классификационные показатели глинистых грунтов по числу пластичности  $I_p$ : супеси  $0,03 \leq I_p \leq 0,07$ ; суглинки легкие:  $0,07 < I_p \leq 0,10$ ; суглинки средние:  $0,10 < I_p \leq 0,14$ ; суглинки тяжелые  $0,14 < I_p \leq 0,17$ ; глины  $0,17 < I_p \leq 0,30$ ; глины  $0,30 < I_p \leq 0,50$ , из условия, что опорным нижнего конца сваи (острия) принимается глинистый грунт с показателем текучести  $I_L \leq 0,5$ .

В данном предположении расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи рекомендуется (увязать) согласовать с начальным коэффициентом пористости грунта  $e_0$ , так как грунт в уплотненной платформе уплотняется от исходного  $e_0$  до  $e_k$ . А конечное значение коэффициента пористости  $e_k$  определяется по сопоставлению объема сформированной щели вокруг ствола сваи с начальным коэффициентом пористости  $e_0$  и объема сформированной уплотненной платформы с конечным коэффициентом пористости  $e_k$ , т. е. коэффициент пористости уплотненной платформы с конечным коэффициентом пористости  $e_k$ . Отсюда коэффициент пористости уплотненной платформы  $e_k$  может быть определен из уравнения равновесия:  $e_k \cdot V_{щ} = V_{пл} \cdot e_0$ ; откуда получаем  $e_k$ :

$$e_k = e_0 V_{пл} / V_{щ} \quad (2)$$

где:  $e_0$  – начальный коэффициент пористости грунта (по данным изысканий);  
 $V_{пл} = 2/3(lc \cdot \varphi_{cp} / 4 + d_{св} / 2)^3$  – объем уплотненной платформы под острием сваи;

$V_{щ} = lc \cdot \varphi (4/3lc \cdot \varphi^2 \cdot t g^2 \varphi / 4 + 2dlt \cdot \varphi / 4)$  – объем сформированной щели вокруг ствола сваи;

Пренебрегая величинами второго и третьего порядка малости  $d^2$  и  $d^3$ , относительно длины сваи  $l$  получим:

$$V_{пл} = 2/3lc \cdot \varphi^3 \cdot t g^3 \varphi / 4 \text{ – объем платформы,}$$

$$V_{щ} = 4/3lc \cdot \varphi^3 \cdot t g^3 \varphi / 4 \text{ – объем щели.} \quad (3)$$

Если представить, что объем минеральных частиц грунта, находящихся в сформированной платформе, равен объему минеральных частиц грунта, находящихся в объеме сформированной щели вокруг ствола забивной сваи, можно записать равенство:

$$m_{пл} = m_{щ},$$

где:  $m_{пл}$  – объем минеральных частиц в единице объема грунта уплотненной платформы в плоскости острия сваи;

$m_{щ}$  – объем минеральных частиц в единице объема грунта естественного состояния, находящегося в объеме сформированной щели вокруг ствола сваи.

Учитывая, что объем минеральных частиц в единице объема грунта

$m = \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{1}{1+e}$ , равенство  $m_{пл} = m_{щ}$  запишется выражением:

$$\frac{\rho_{d,пл}}{\rho_s \cdot V_{пл}} = \frac{\rho_d}{\rho_s \cdot V_{щ}} \quad (4)$$

Из равенства (4) определяется плотность сухого грунта в уплотненной платформе:

$$\rho_{d,пл} = \frac{4}{3} \cdot \frac{l_{св}^3 \cdot t g^3 \cdot \frac{\varphi}{4}}{l_{св}^3 \cdot t g^3 \cdot \frac{\varphi}{4}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \rho_{dщ} = 2 \rho_{dщ} \quad (5)$$

$$\text{(при } \rho_{dщ} = 1,35 \text{ т/м}^3, \rho_{d,пл} = 2,7 \text{ т/м}^3 = \rho_s \text{)}$$

Из представленного приближенного расчета плотности грунта в уплотненной платформе следует: в уплотненной платформе плотность грунта  $\rho_{d,пл}$  стремится к плотности частиц грунта –  $\rho_s$ , т. е.  $\rho_{d,пл} = \rho_s m / m^3$ , что и является причиной высоких значений расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи (под острием сваи)  $R$ , представленных в таблицах, действовавших и сегодня действующих нормативных документов по свайным фундаментам [7–10] на территории бывшего СССР, современных Украины,



полупространстве не проявляется, а проявляется общая деформация подстилающего платформу слоя, толщина которого равняется сжимаемой толщине и определяется в зависимости от принятой расчетной схемы: линейно деформированного полупространства или упругого слоя конечной толщины (рис. 2). При этом сформированная уплотненная платформа толщиной  $h = (l_{св} t q \varphi_{ср} / 4 + d_{св})$  входит не вжимаемую толщину, а во внешние габариты условного фундамента вместе с весом платформы, прибавляемым к весу условного фундамента, т.е. общая нагрузка на подстилающий слой  $P$  равна:

$$P = P_{пл} + P_{св} + P_{мас} + P_{соор}. \quad (9)$$

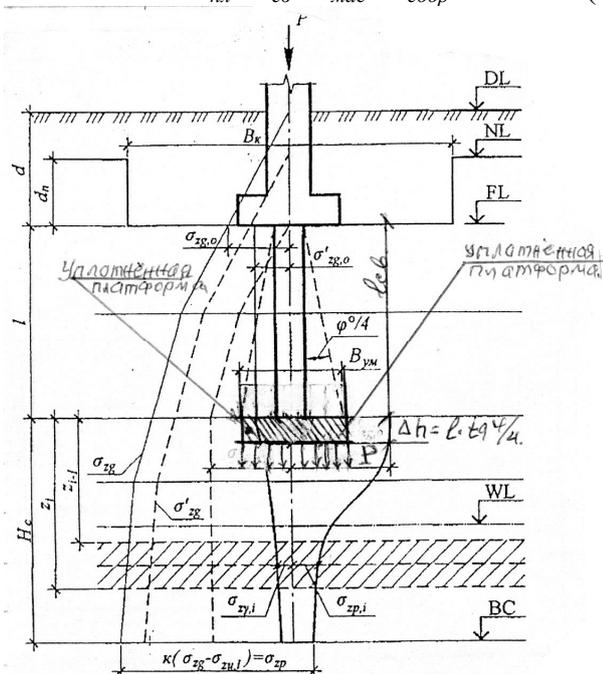


Рис. 2. Расчетная схема к расчету осадки свайного фундамента с учетом уплотненной платформы

Осадку условного фундамента с подошвой, соответствующей сформированной уплотненной платформе, определяют: 1) по первой расчетной схеме способом элементарного суммирования с условным ограничением сжимаемой толщи согласно ДБН В2.1.-10-2009; 2) по второй расчетной схеме упругого слоя конечной толщины в зависимости от размеров в плане условного фундамента. Вторая расчетная схема не вошла в ДБН В2.1.-10-2009 как способ расчета осадки большеразмерных фундаментов в плане и не получила

альтернативный вариант. Расчетные значения осадок большеразмерных фундаментов; элеваторов, дымовых труб и других инженерных сооружений, полученных расчетом по первой расчетной схеме, дают завышенные результаты, значения которых превышают предельно допустимые осадки для указанных выше и им подобных зданий и сооружений.

Данные наблюдения за осадками фундаментов РО АЭС и турбоагрегатов [16] подтверждают целесообразность использования второй расчетной схемы при определении осадки условного фундамента для перечисленных выше зданий и сооружений.

в) Истинный отказ сваи – добивка после «отдыха»

За период погружения сваи в глинистые грунты деформация подстилающего уплотненную платформу грунта происходит от импульсной динамической нагрузки, представляющей ударной, проявление которой реализуется увеличением напорного градиента  $I$  и выдавливанием воды из-под грунта, объем которой определяется из закона Дарси:

$$Q = K \cdot A \cdot I \cdot t, \quad (10)$$

где  $Q$  – объем воды в единице объема грунта, подстилающего платформу слоя;

$A$  – площадь поперечного сечения столба массива грунта в пределах площади условного фундамента;

$t$  – время (по паспортным данным сваебойного агрегата);

$K$  – коэффициент водопроницаемости (фильтрации);

$I$  – гидравлический градиент:  $I = (H_2 - H_1) / l$ ;  $H_2 - H_1$  – потеря напора;

$l$  – длина пути фильтрации.

Имея время действия ударной нагрузки  $t$  (по паспорту сваебойного агрегата) определяем объем воды  $Q$ , выдавленный из рассматриваемого объема массива грунта, расположенного ниже уплотненной платформы за время передачи на сваю ударной нагрузки одного цикла по формуле:

$$Q = K \cdot A \cdot I \cdot t. \quad (11)$$

Остаток воды в массиве грунта ниже платформы указывает на долю возможной

мгновенной осадки основания уплотненной платформы от одного удара (отказ сваи):

$$Q=Q-Q'; \quad (12)$$

$$S=a. \quad (13)$$

Если считать, что осадка реализуется полностью за деформацией слоя грунта по выдавленному объему воды из единичного объема массива водонасыщенного грунта от одного удара и соответствующего уменьшению объема пор за счет деформации (отказа), то получаем зависимость изменения отказа сваи с учетом включения в работу свай сил трения грунта на боковую поверхность столба массива грунта после отдыха сваи  $R_f$ , т. е. среднее давление под подошвой уплотненной платформы (условного фундамента):

$$P_{cp}=N-R_f/(2l_{ce} \cdot tq \varphi/4+d_{ce})^2, \quad (14)$$

где  $N$  – вертикальная вдавливающая нагрузка на сваю (импульс ударной нагрузки) с учетом коэффициента динамичности  $K_d$  по паспорту сваебойного агрегата;

$R_f$  – силы трения грунта на боковую поверхность столба грунта в пределах площади условного фундамента (уплотненной платформы) высотой равной отказу –  $a$ ;

$$R_f=U \sum f \cdot a, \quad (15)$$

где  $U$  – периметр поперечного сечения столба грунта в пределах размеров уплотненной платформы;

$f$  – коэффициент трения грунта уплотненной платформы по подстилающему грунту (кПа):

$$f=\sigma \cdot tq \varphi + C. \quad (16)$$

Тогда отказ сваи  $a$  определится из условия равновесия:

$$P_{cp} \cdot (2l_{ce} \cdot tq \varphi/4+d_{ce})^2=N-R_f; \quad (17)$$

$$a=N-P_{cp} \cdot (2l_{ce} \cdot tq \varphi/4+d_{ce})^2/U \cdot \sum f_i. \quad (18)$$

Вычисленное значение отказа после «отдыха» сваи  $a$  сравнивается со значением истинного отказа, замеренного по добивке свай после «отдыха»; назначается проектный отказ сваи и определяется несущая способность сваи по формуле Герсеванова (ДБН В2.1-10-2009).

Проанализированные деформационные процессы подстилающего уплотненную платформу слоя происходят от передачи

нагрузок на подстилающий слой не через сваю, а через уплотненную платформу. Отказ сваи – это осадка подстилающего слоя от передачи на него нагрузки через уплотненную платформу, поэтому силы трения грунта на боковую поверхность ствола сваи участвуют здесь косвенно. В данном случае этот процесс заменяется силами трения подстилающего платформу слоя на боковую поверхность уплотненной платформы, которые вправе определять как силы трения грунта по грунту с использованием закона трения в механике грунтов; т. е.  $f=\tau=Ptq\varphi+c$ , кПа; где  $P$ ,  $\varphi$ ,  $c$ , соответственно: давление, угол трения, удельное сцепление подстилающего слоя.

Изложенные выше позиции авторов по вопросу формирования несущей способности забивных железобетонных свай – формирование расчетного сопротивления грунта под острием сваи  $R$  показывают, что в результате образования уплотненной платформы в плоскости острия свай из глинистого грунта твердой консистенции ( $I_l < 0$ ), в процессе технологического уплотнения грунта и формирования уплотненной зоны) платформы вода из пор грунта отжимается и перемещается вниз в подстилающий платформу грунт. Поэтому при направленном давлении сверху вниз консистенция  $I_l$  подстилающего образовавшуюся платформу грунта может и, по-видимому, изменяется (увеличивается), что в конечном итоге снижает несущую способность грунта, подстилающего платформу. Это будет влиять на несущую способность свайного фундамента при принятии новой расчетной схемы фундамента, как массивный фундамент с уплотненной платформой служащей подошвой фундамента, опирающегося этой подошвой на подстилающий слой.

Принцип формирования сил трения грунта на боковую поверхность ствола сваи нами изложен в статье «Обоснование сил трения грунта на боковую поверхность ствола свай и подземных сооружений при изменении гидрогеологических условий подтопляемой строительной площадки» [15].

Авторы данной статьи не отрицают тиксотропных явлений в глинистых грунтах, которые в зависимости от технологических процессов, происходящих на площадке в период эксплуатации (проявление динамических, сейсмических и техногенных процессов), могут упрочняться и разуплотняться, в одном случае положительно влияя на несущую способность свай, в другом отрицательно. В связи с обратными процессами проявления тиксотропных свойств глинистых грунтов, авторы считают, что увеличение несущей способности свай за счет тиксотропного упрочнения при его положительном проявлении будет формироваться резерв несущей способности свай, а при отрицательном – разупрочнении несущая способность свай не снижается.

Поклонники Ленинградской школы работы свай в глинистых грунтах – проф. Н. М. Глотов, А. А. Луга, К. С. Силин и другие также придерживаются концепции тиксотропного упрочнения грунта как под нижним концом свай, так и на боковой поверхности ствола свай, за счет которого увеличивается несущая способность свай во времени [2].

Концепции радиального уплотнения грунта вокруг ствола свай при погружении свай сваебойным агрегатом придерживается В. С. Кириллов [4].

Осадку свайного фундамента и Ленинградская школа, и ученые, поддерживающие ее концепцию, рекомендуют рассчитывать как осадку условного фундамента, подошва которого располагается на отметке, равной отметке нижнего конца свай с размерами в плане, вычисляемыми по формуле:  $l_y = l_{cb} \cdot t_q \varphi_{cp}/4 + l_k$ ;  $e_y = l_{cb} \cdot t_q \varphi/4 + e_k$ , указывая при этом, что  $\varphi/4$  – угол, под которым распространяются напряжения в свайном массиве за счет выпора грунта из-под острия свай и его принудительным уплотнением.

Таким образом, принимается Одесская концепция, т. е. в процессе погружения свай сваебойным агрегатом происходит выпор грунта из-под острия свай, его уплотнение давлением от собственного веса грунта по

глубине и горизонтальным давлением, чем уплотняется и прижимается выпираемый грунт к острию свай и к приостриенной части ствола свай.

В связи с большим усилием прижатия выпирающегося грунта к острию свай и к приостриенной зоне, значительно превышающей силы трения грунта на боковую поверхность острия свай « $f$ », выпираемый из-под острия свай грунт, прижатый к острию, перемещается вместе с острием и формирует подошву условного фундамента, распространяющуюся по глубине под углом  $\alpha = \varphi_{cp}/4$  к вертикальной оси свай. Указанное предложение Одесской школы внедрено в нормативные документы по свайным фундаментам всех выпусков. Это следует считать как признание законодательными органами по строительству (Госстрой) и учеными в области фундаментостроения принятой схемы работы свай в глинистом грунте, предложенной Одесской школой и развитой авторами этой статьи до применения на практике.

Данная концепция позволяет дать обоснованные ответы на поставленные выше вопросы:

1) Почему в процессе погружения свай сваебойным агрегатом вокруг ствола свай образуется щель?

2) Почему в плоскости острия свай расчетное сопротивление грунта (по действующим нормативным документам)  $R_o$  в 8 ÷ 10 раз превышает расчетное сопротивление грунта на глубине нижнего конца свай, определенного, согласно ДБН В2.1-10-2009, по решениям Н. Г. Пузыревского?

3) Почему в процессе эксплуатации свайных фундаментов проявляется деформация (прогиб) поверхности грунта в межсвайном пространстве (а не выгиб при радиальном «уплотнении» грунта вокруг ствола свай)? и на многие другие технические и технологические вопросы, подтверждающие работоспособность принятой расчетной схемы, касающейся работы забивных свай в глинистых грунтах.

2) *Что касается работы свай в региональных (просадочных или набухающих) глинистых грунтах*, то при принятых аналогичных технологиях погружения свай в лессовые просадочные грунты (забивка свай по лидерным скважинам, замачивание грунта в лидерных скважинах и др. процессах), формирование выпора грунтов из-под острия сваи остается таким же, как и для обычных аллювильно-делювильных глинистых грунтов, а технологические приемы (устройство лидерных скважин, замачивание грунта в лидерных скважинах) применяются всего лишь для облегчения погружения свай. Так как выпирающий из-под острия сваи грунт уплотняется той же нагрузкой  $P$ , то в процессе погружения сваи сваебойным агрегатом повторяются те же технологические процессы, с тем же отжатием воды из формирующейся уплотненной платформы из твердого глинистого (лессового) грунта, перемещением отжатой воды из формирующейся платформы в нижние, подстилающие платформу слои грунта, с тем же эксплуатационным эффектом и теми деформациями подстилающей платформу грунта.

Формирование уплотненной платформы под нижними концами свай влечет за собой образование щели вокруг ствола сваи в той же последовательности, так что все структурные связи в грунте нарушаются вокруг образовавшейся щели по длине ствола сваи и вокруг ствола сваи и после «отдыха» сваи, за счет перемещения грунта из области больших давлений ( $P=\gamma \cdot h$ ) в межсвайном пространстве в область низких давлений ( $P=0$ ) на внутренней поверхности щели происходит то же разуплотнение грунта в межсвайном пространстве.

*В связи с этим следует считать, что при замачивании грунта в межсвайном пространстве происходят не просадочные деформации лессового просадочного грунта, а провальные деформации разуплотненного грунта межсвайного пространства с передачей сил*

*отрицательного трения  $P_n$  на боковую поверхность ствола сваи.*

Проявление провальных деформаций грунта межсвайного пространства влечет за собой новое формирование сил трения на боковую поверхность ствола сваи, которые можно определить по тем же законам механики грунтов, согласно закону Кулона: т. е.  $f = \tau = Ptq \varphi + c$ ,

где  $P$  — давление от собственного веса разуплотненного грунта межсвайного пространства (причем разуплотнение увеличивается сверху вниз, как было показано раньше, а при уменьшении  $\gamma$  -сверху вниз) щель формируется по закону  $t = l \cdot tq \varphi / 4$ ; ( $l$  — фиксированная длина сваи ( $l = f(t)$ )).

При этом снимается вопрос размера условной глубины учета сил отрицательного трения ( $h=6$  м, что требует доказательства, почему именно  $h=6$  м), а следует учитывать фиксированную —  $h$  по всей длине сваи (не требует доказательства — почему?).

Изменения удельного веса грунта межсвайного пространства с учетом образования щели, распространяющейся по глубине по закону  $t = l_{св} tq \varphi / 4$ , показывает, что при «закрытии» трещины разуплотнение грунта межсвайного пространства увеличивается с увеличением глубины и при достижении глубины, равной проектной отметке острия сваи, достигает максимального разуплотнения. В таком предположении давление грунта (или напряжение в грунте) по глубине от собственного веса выравнивается и может быть принято как среднее  $P = \sigma_{ср} = \gamma_e + \gamma_n / 2 \cdot l_{св}$ , которое и определяет силы трения грунта на боковую поверхность ствола сваи.

**Выводы.** На основании выполненного анализа существующих расчетных схем работы сваи в грунте установлено:

1) Гипотеза формирования несущей способности сваи за счет тиксотропного упрочнения глинистого грунта не дает ответов на ряд технических и технологических вопросов и не может эффективно применяться в расчете и проектировании свайных фундаментов из

забивных железобетонных свай в глинистых грунтах.

2) Предложенная Одесской школой расчетная схема работы свай в глинистых грунтах, развитая и дополненная авторами данной статьи, дает обоснованные ответы на все технические и технологические вопросы в разрезе формирования несущей способности сваи «по острию» с учетом формирования уплотненной платформы и

приемлемые результаты как для аллювиально-делювиальных, так и для региональных лессовых просадочных и набухающих глинистых грунтов.

В связи с этим данная гипотеза имеет значительные преимущества над первой (тиксотропной) и рекомендуется для применения в расчетах и проектировании свайных фундаментов в глинистых грунтах.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Нарбут Р. М. Работа свай в глинистых грунтах / Р. М. Нарбут. – Ленинград : Стройиздат, 1972. – 159 с.
2. Голубков В. Н. Несущая способность свайных оснований / В. Н. Моторный. – Москва : Машстройиздат, 1950. – 143 с.
3. Свайные фундаменты / Глотов Н. М., Луга А. А., Силин К. С., Завриев К. С. – Москва : Транспорт, 1975. – 430 с.
4. Трофименков Ю. Г. Свайные фундаменты для жилых и промышленных зданий / Трофименков Ю. Г., Ободовский А. А. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Москва : Стройиздат, 1970. – 240 с.
5. Кириллов В. С. Основания и фундаменты / Кириллов В. С. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Москва : Транспорт, 1980. – С. 202–210.
6. Мустафаев А. А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах / А. А. Мустафаев. – Москва : Высшая школа, 1989. – 590 с.
7. Журнаджи В. А. Механика грунтов, основания и фундаменты / В. А. Журнаджи, В. В. Николаев. – Москва : Высшая школа, 1967. – 416 с.
8. Свайные фундаменты. Нормы проектирования : СНиП II-Б.5-67 / Госстрой СССР. – Действие завершено 01.01.1979. – Москва : Стройиздат, 1971. – 20 с.
9. Свайные фундаменты. Нормы проектирования : СНиП II-17-77 / Госстрой СССР. – Действие завершено 01.01.1987. – Москва: Стройиздат, 1978. – 48 с.
10. Свайные фундаменты. Нормы проектирования : СНиП 2.02.03.85 / Минстрой России. – Взамен СНиП II-17-77 ; введ. 1987-01-01. – Москва : Стройиздат, 1995. – 48 с.
11. Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – Введ. вперше зі скасуванням на території України СНиП 2.02.01-83 ; чинні від 2009-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – Гл. 8 : Розрахунки фундаментів за конструктивними особливостями та умовами взаємодії з основою. – С. 21-51.
12. Моторный Н. А. Обоснование работы свай в грунте и формирование несущей способности свай в процессе ее погружения и эксплуатации / Н. А. Моторный, А. Н. Моторный // Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference), Warsaw, May, 2013 / ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2013. – Vol. 21. – P. 501–508.
13. Моторный А. Н. Современные представления несущей способности забивных свай (по результатам погружения и работе, свай в грунте) / А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 8. – С. 32–42.
14. Моторный Н. А. О достоверности современной работы ростверка свайного фундамента с основанием / Н. А. Моторный, А. Н. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2013. – № 12. – С. 37–43.
15. Большаков В. И. Обоснование сил трения грунта на боковую поверхность ствола свай и подземных сооружений при изменении гидрогеологических условий подтопленной строительной площадки / Большаков В. И., Моторный А. Н., Моторный Н. А. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2016. – № 7. – С. 10–20.
16. Бауск Е. А. Особенности деформирования оснований фундаментов реакторных отделений Запорожской АЭС / Е. А. Бауск, С. И. Головкин, В. Б. Шведа // Энергетическое строительство. – 1989. – № 2. – С. 43–46.

## REFERENCES

1. Narbut R.M. *Rabota svay v glinistykh gruntakh* [Piles work in clay soils]. Leningrad: Strojizdat, 1972, 159 p. (in Russian).

2. Golubkov V.N. *Nesushchaya sposobnost' svaynykh osnovaniy* [The bearing capacity of pile basements]. Moskva: Mashstroyizdat, 1950, 143 p. (in Russian).
3. Glotov N.M., Luga A.A., Silin K.S. and Zavriev K.S. *Svaynye fundamenti* [Piles foundations]. Moskva: Transport, 1975, 430 p. (in Russian).
4. Trofimenkov Yu.G. and Obodovski A.A. *Svaynye fundamenti dlya zhilykh i promyshlennykh zdaniy* [Pile foundations for residential and industrial buildings]. Moskva: Stroyizdat, 1970, 240 p. (in Russian).
5. Kirillov V.S. *Osnovaniya i fundamenti* [Basements and foundations]. Moskva: Transport, 1980, pp. 202–210. (in Russian).
6. Mustafaev A. A. *Fundamenti na prosadochnykh i nabuhajushchih gruntah* [Foundations on subsiding and swelling soils]. Moskva: Vysshaya shkola, 1989, 590 p. (in Russian).
7. Zurnadzi V.A. and Nikolaev V.V. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti* [Soils mechanics, basements and foundations]. Moskva: Vysshaya shkola, 1967, 416 p. (in Russian).
8. Gosstroy SSSR. *Svaynye fundamenti. Normy proektirovaniya: SNiP II-B.5-67* [The pile foundations. The State Building Codes: II-B.5-67]. Moskva: Stroyizdat, 1971, 20 p. (in Russian).
9. Gosstroy SSSR. *Svaynye fundamenti. Normy proektirovaniya: SNiP II-17-77* [Piles foundations. The Buildings Codes: II-17-77]. Moskva: Stroyizdat, 1978, 48 p. (in Russian).
10. Ministroy Rossii. *Svaynye fundamenti. Normy proektirovaniya: SNiP 2.02.03.85* [The pile foundations. The State Building Codes: II-17-77]. *Vved. 1987-01-01* [Dated on 1987-01-01]. Moskva: Stroyizdat, 1995, 48 p. (in Russian).
11. Minregionbud Ukrainy. *Obekty budivnytstva ta promyslova produktsiia budivelnoho pryznachennia. Osnovy ta fundamenti budynkiv i sporud. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannya: DBN V.2.1-10-2009* [The construction objects and industrial products for the construction purposes. Basements and foundations of buildings and structures. Basements and foundations of buildings. The State Building Codes: V.2.1-10-2009]. *Gl. 8: Rozrakhunky fundamentiv za konstruktyvnymi osoblyvostiamy ta umovamy vzaemodii z osnovoju* [Chapter 8: The foundation calculations by structural features and interaction conditions with the foundation]. *Chynni vid 2009-07-01* [Dated on 2009-07-01]. Kyiv, 2009, pp. 21-51. (in Ukrainian).
12. Motorny N.A. and Motorny A.N. *Obosnovanie raboty svay v grunte i formirovanie nesushchey sposobnosti svay v protsesse ee pogruzheniya i ekspluatatsii* [The piles work substantiation in the soil and the formation of the piles bearing capacity in the process of driving and operation]. *Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference), Warsaw, May. 2013, vol. 21, pp. 501–508.* (in Russian).
13. Motorny A.N. and Motorny N.A. *Sovremennye predstavleniya nesushchey sposobnosti zabivnykh svay (po rezul'tatam pogruzheniya i rabote, svay v grunte)* [Modern ideas of the bearing capacity of driven piles (by results of driving and piles work in the ground)]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2014, no. 8, pp. 32–42. (in Russian).
14. Motorny N.A. and Motorny A.N. *O dostovernosti sovremennoy raboty rostverka svaynogo fundamenta s osnovaniem* [About modern work reality of the piles foundation frame with basements]. *Visnyk Prydniprovsk'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2013, no. 2, pp. 37–43. (in Russian).
15. Bolshakov V.I., Motorny A.N. and Motorny N.A. *Obosnovanie sil treniya grunta na bokovuyu poverkhnost' stvola svay i podzemnykh sooruzheniy pri izmenenii gidrogeologicheskikh usloviy podtoplyaemoy stroitel'noy ploshchadki* [The ground forces friction substantiation on the lateral surface of the pile shaft and underground constructions at the change of hydro-geological conditions of the impounded construction site ]. *Visnyk Prydniprovsk'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'ka Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2016, no. 7, pp. 10–20. (in Russian).
16. Bausk E.A., Golovko S.I. and Shvets V.B. *Osobennosti deformirovaniya osnovaniy fundamentov reaktornykh otdeleniy Zaporozhskoy AES* [The deformation features of reactor compartments foundations of the Zaporizhzhya NPS]. *Energeticheskoe stroitel'stvo* [Energy construction]. 1989, no. 2, pp. 43–46. (in Russian).

Рецензент: д-р т. н., проф. Седін В. Л.

Надійшла до редколегії: 20.07.2016 р.

Прийнята до друку: 25.08.2016 р.