



Тимофей Пецольд  
Дмитрий Лазовский  
Виталий Хороща  
Александр Волосач  
Александр Поправко

## Монолитные железобетонные фундаментные плиты ледовых полей МКСК “Минск-Арена”

На основании компьютерного моделирования методом конечных элементов проведены расчеты неразрезных охлаждающих плит ледовых полей многопрофильного культурно-спортивного комплекса “Минск-Арена” с проверкой давления в подошве фундамента, распределения упругих деформаций с учетом естественных напластований грунтов, расчет и подбор армирования конструкций фундамента с учетом расчетных постоянных, временных и монтажных нагрузок.

Технологическая схема охлаждаемых плит, которая включает устройство льда, водоподготовку, подачу хладоносителя, вентиляцию и автоматику, разработана фирмой “BARON Termodinamica” (Италия). Кроме этого дана конструктивная схема охлаждаемой плиты с жесткими требованиями к ее основанию. Монолитная железобетонная плита основания должна воспринимать значительные нагрузки без вертикальных перемещений. Поверхность плиты должна соответствовать категории А1 и иметь отклонения по вертикали не более +5 мм, без трещин.

Плита конькобежного стадиона представляет собой эллипс с главными осями 180 и 70 м и состоит из 4 частей, разделенных подпольными каналами, в которых размещаются коллекторы тепло- и холодоснабжения. Беговая дорожка шириной 16 м технологически отделена от внутренней части поля.

Плита спортивно-зрелищной арены имеет размеры в плане 60 x 30 м и состоит из 2 частей, разделенных подпольным каналом (рис. 1). На монолитной железобетонной плите основания толщиной 250 мм расположена многослойная технологическая плита толщиной 350 мм. Она состоит из подогреваемого бетонного слоя с полиэтиленовыми трубками для пропуска нагретой воды, пароизоляционного и теплоизоляционного слоев, слоя скольжения и охлаждаемого бетонного слоя, в кото-

ром находятся полиэтиленовые трубки для подачи хладоносителя.

Согласно архитектурно-конструктивному решению [1], плита основания ледовых полей представляет собой железобетонную плиту на упругом основании.

Фундаментная плита толщиной 250 мм моделировалась 3- и 4-угольными плитными конечными элементами на упругом основании. В расчете принят класс бетона конструкций С25/30 ( $E = 38$  ГПа). Упругое основание описывается модулем деформаций грунтов, залегающих в подошве плиты. В соответствии с результатами инженерно-геологических изысканий [2] и принятой глубиной заложения плит основанием является

песчано-гравийная подушка толщиной 2 м, ниже которой располагаются грунты естественного залегания:

– для плиты основания конькобежного стадиона: песок крупной средней прочности ( $P_d < 8$  МПа,  $c = 6/4$  кПа,  $\phi = 39/35^\circ$ ,  $E = 22$  МПа), песок средней прочности ( $P_d < 8$  МПа,  $c = 6/4$  кПа,  $\phi = 39/35^\circ$ ,  $E = 22$  МПа);

– для плиты основания многофункциональной спортивно-зрелищной арены: песок мелкий прочный ( $c = 11/7,3$  кПа,  $\phi = 34/31^\circ$ ,  $E = 27$  МПа), песок крупной средней прочности ( $P_d < 8$  МПа,  $c = 3/2$  кПа,  $\phi = 38/35^\circ$ ,  $E = 18$  МПа), песок крупной средней прочности ( $P_d < 8$  МПа,  $c = 6/4$  кПа,  $\phi = 39/35^\circ$ ,  $E = 22$  МПа).

В принятых расчетных схемах учитывалось утолщение плит по контуру и в местах опирания на монолитные железобетонные лотки в виде железобетонных балок, жестко связанных с плитой. Контурные балки сечением 1000 x 500 мм опираются на упругое основание, а железобетонные балки в местах опирания на лотки имеют сечение 1000 x 1050 мм и шарнирно опираются на лотки (рис. 1).

Учитывая наличие по площади плит основания грунтов с различными характеристиками, в каждом элементарном слое вычислялось средневзвешенное значение удельного веса и модуля деформаций грунта. Для этого площадь подошвы плит основания разбита на элементарные площадки исходя из влияния имеющихся скважин (рис. 2).

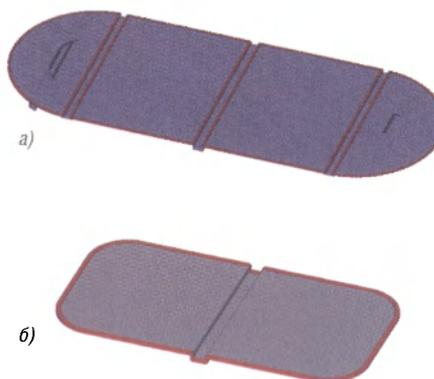


Рис. 1. Конструктивные схемы монолитных плит основания: а – ледового поля конькобежного стадиона; б – многофункциональной спортивно-зрелищной арены

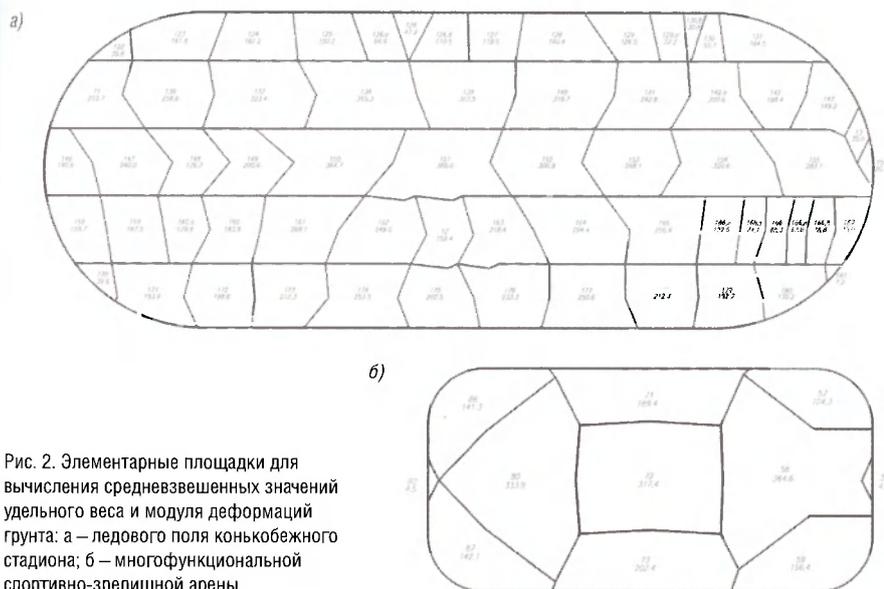


Рис. 2. Элементарные площадки для вычисления средневзвешенных значений удельного веса и модуля деформаций грунта: а – ледового поля конькобежного стадиона; б – многофункциональной спортивно-зрелищной арены

Расчеты основания и конструкций монолитной железобетонной плиты основания выполнены с применением сертифицированных расчетных комплексов SCAD-Office (Киев, Украина), MicroFE-STARK (Еврософт, Москва), БЕТА (ПГУ, Беларусь) с учетом их совместной работы на основе принятой конструктивной схемы и данных инженерно-геологических изысканий [2]. Они включали в себя:

- расчет основания с проверкой давления в подошве фундамента, его крена и конечной стабилизированной осадки;
- статический расчет и подбор армирования конструкций монолитной железобетонной плиты основания с учетом расчетных постоянных и временных нагрузок.

При расчете плит основания ледового поля конькобежного стадиона и мно-

гофункциональной спортивно-зрелищной арены учтены следующие расчетные постоянные, временные и монтажные нагрузки:

- постоянная нагрузка от собственного веса элементов сооружения (вычислялась автоматически, исходя из заданных при расчете размеров сечения и объемного веса железобетона);
- постоянная нагрузка от технологического оборудования (технологическая плита с трубами гликолевой воды охлаждения катка, утеплитель, слой с трубами гликолевой противоморозной воды) – расчетное значение 841 кг/м<sup>2</sup>;
- постоянная нагрузка от веса лотков – расчетное значение 2889 кг/м<sup>2</sup>;
- временная нагрузка от скопления людей – расчетное значение 750 кг/м<sup>2</sup>;
- временная сосредоточенная нагрузка от монтажного крана (нагрузка А11 по [6] на колесо) – расчетное значение 8250 кг;
- временная распределенная нагрузка от поливочной машины (вес 4000 кг по площади  $(0,6+2(0,35))^2 = 1,7$  м<sup>2</sup> с учетом вышерасположенной конструкции пола толщиной 350 мм) – расчетное значение 3600 кг/м<sup>2</sup>.

В расчете все нагрузки приняты с учетом соответствующих коэффициентов безопасности G (Приложение А [4]).





Рис. 3. Вертикальное давление в подошве плиты основания ледового поля конькобежного стадиона

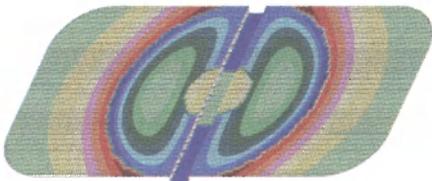


Рис. 4. Вертикальное давление в подошве плиты основания многофункциональной спортивно-зрелищной арены

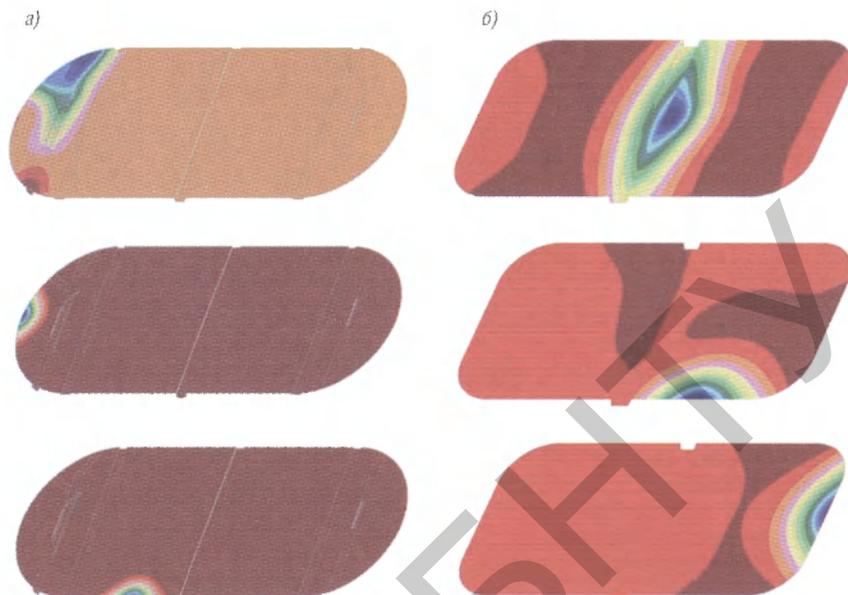


Рис. 5. Вертикальные деформации узлов плит основания в месте сосредоточенной нагрузки от колес монтажного крана: а – ледового поля конькобежного стадиона; б – ледового поля многофункциональной спортивно-зрелищной арены

Расчет давления в подошве плит основания производился на действие комбинаций нормативных постоянных и временных нагрузок. Результаты расчета вертикального давления в подошве плит основания при самых невыгодных комбинациях загрузений приведены на рис. 3, 4.

Максимальное давление в подошве плит основания составляет:  $p_o = 0,33 \text{ кг/см}^2$  (для плиты основания конькобежного стадиона) и  $p_o = 0,25 \text{ кг/см}^2$  (для плиты основания многофункциональной спортивно-зрелищной арены), что меньше минимально возможного для насыпного грунта  $R = 1 \text{ кг/см}^2$ . Условие  $p_o < R$  выполняется.

Максимальное значение вертикальных деформаций плит основания в месте сосредоточенной нагрузки от колес монтажного крана (рис. 5) в зависимости от его месторасположения – от 0,26 до 1,54 см (для плиты основания конькобежного стадиона) и от 0,29 до 1,65 см (для плиты основания многофункциональной спортивно-зрелищной арены), что меньше значений, допускаемых нормами [3].

Расчет внутренних усилий элементов расчетных схем производился на действие комбинаций расчетных постоянных и временных нагрузок. Коэффициенты безопасности для нагрузок принимались в соответствии с СНБ 5.03.01–02 [4]: для постоянных нагрузок –  $\gamma_G = 1,35$ , временных –  $\gamma_Q = 1,5$ . Для пластинчатых конечных элементов плит на упругом основании вычислялись изгибающие моменты вдоль осей X и Y при различных комбинациях загрузений. На рис. 6, 7 приведено распределение изгибающих моментов из плоскости

во взаимно перпендикулярных направлениях на 1 пог. м днща фундамента при действии наиболее невыгодной комбинации расчетных нагрузок.



Рис. 6. Распределение изгибающих моментов вдоль оси X (а) и оси Y (б) в плите основания ледового поля конькобежного стадиона

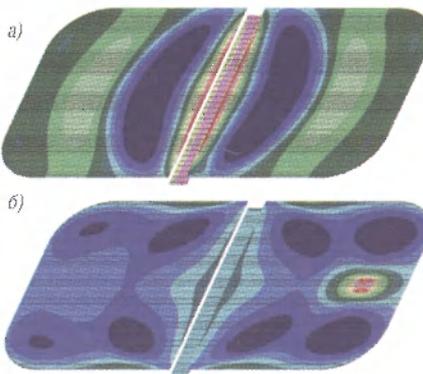


Рис. 7. Распределение изгибающих моментов вдоль оси X (а) и оси Y (б) в плите основания многофункциональной спортивно-зрелищной арены

Для стержневых конечных элементов контурных балок и балок в местах опирания на монолитные железобетонные лотки приводятся результаты вычисления изгибающих моментов.

Расчет сечений по прочности нормальных к продольной оси элементов железобетонного фундамента производился на основе деформационной расчетной модели с использованием расчетных диаграмм деформирования материалов в соответствии с [4] при линейно-упругих расчетах конструкций и нелинейных расчетах сечений из условия метода предельных состояний

$$S_d \leq R_{dF} \quad (1)$$

где  $S_d$  – внутреннее усилие из линейно-упругого расчета, вызванное расчетной комбинацией нагрузок в рассматриваемом сечении элемента;  $R_{dF}$  – предельное усилие, которое способна воспринять конструкция, определяемое в общем случае параметрами рассматриваемого сечения элемента при нелинейном расчете:

$$R_d = R \left( \frac{\alpha \cdot f_{ck}}{\gamma_c}, \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, b, h, \dots, a_d \right) \quad (2)$$

Расчет по раскрытию трещин производится из условия

$$w_k = \beta \left( 50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\varnothing}{\rho_{eff}} \right) \varepsilon_s \psi_s \leq w_{lim} \quad (3)$$

где  $w_k$  – расчетная ширина раскрытия трещин;  $w_{lim}$  – предельно допустимая ширина раскрытия трещин;  $\varepsilon_s$  – деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной, определяемая в общем случае из решения расчетной системы уравнений деформационной модели;  $\varnothing$  – диаметр арматуры (в мм);  $\rho_{eff}$  –

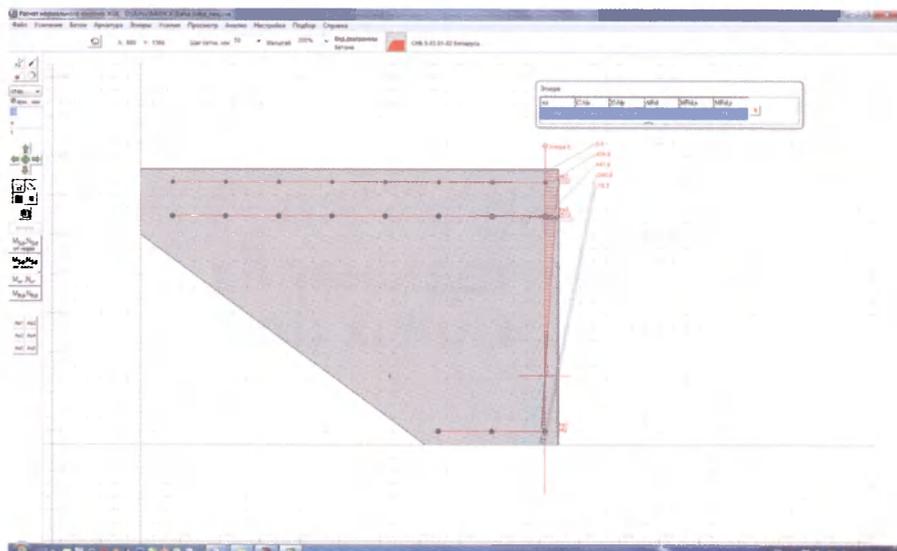


Рис. 8. Распределение относительных деформаций и напряжений по высоте сечения, нормального к продольной оси элемента

эффективный коэффициент армирования;  $\beta$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты, определяемые по [4].

По данным результатов расчета внутренних усилий с помощью программы БЕТА, в которой реализован нелинейный расчет сечений нормальных к продольной оси, на основе деформационной расчетной модели произведен подбор рабочей арматуры класса S500 из условий прочности и трещиностойкости для наиболее характерных сечений элементов при действии продольных сил и изгибающих моментов в обоих направлениях. Причем в расчете элементов в запас прочности учитывалось только отрицательное влияние продольной силы на прочность и трещиностойкость сечения. Расчет производился для сечений железобетонных элементов шириной 1 м и толщиной в соответствии с принятыми конструктивными размерами. В процессе расчета толщина отдельных железобетонных элементов фундамента корректировалась исходя из требований прочности и трещиностойкости. После корректировки сечений производился пересчет внутренних усилий в элементах и повторный расчет сечений. На рис. 8 приведено распределение относительных деформаций и напряжений по высоте сечения, нормального к продольной оси одного из элементов дна монолитного железобетонного фундамента после подбора армирования при действующих внутренних усилиях.

#### Литература

1. Строительный проект 2.06–02–КР16 РУП "Институт Белгоспроект".
2. Инженерно-геологические изыскания объекта № 1233/06–02 УП "Геосервис".
3. СНБ 5.01.01–99. Основания и фундаменты зданий и сооружений / Министерство архитектуры и строительства. – Минск, 1999. – 36 с.
4. СНБ 5.03.01–02. Бетонные и железобетонные конструкции (с изменениями) / Министерство архитектуры и строительства. – Минск, 2003. – 139 с.
5. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. – 1986. – 36 с.
6. СНиП 2.05.03–84. Мосты и трубы. – 1986. – 199 с.
7. Научно-технический отчет "Разработка решений по устройству неразрезной охлаждающей плиты ледового поля из бетона на напрягающих цементях на объекте "Многопрофильный культурно-спортивный комплекс "Минск-Арена" в г. Минске" / УО БНТУ, МОЦ. – Минск, 2007.

