

Левчук Н.В., Замировский А.В., Василевская М.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУЛЬФАТОСТОЙКОСТИ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ НАПРЯГАЮЩИХ ЦЕМЕНТОВ

Введение. Исследованиям долговечности строительных конструкций из бетона и железобетона в настоящее время уделяется особое внимание. Поэтому детальное изучение долговечности строительных конструкций из бетона и железобетона, подвергающегося воздействию внешней агрессивной среды, остается актуальным [1].

При изготовлении и применении железобетона как материала, отличающегося положительными эксплуатационными свойствами, в том числе высокой коррозионной стойкостью, необходимо учитывать возможность химического взаимодействия с внешней средой. Тем не менее, вследствие разных причин, известно много случаев преждевременного коррозионного повреждения железобетонных конструкций. Такими причинами являются:

- неправильная оценка условий эксплуатации сооружений и конструкций (не учитывается в полной мере агрессивное воздействие среды);
- неправильное назначение состава бетона (его проницаемости, толщины защитного слоя);
- ошибки в технологии изготовления.

Скрытые дефекты проектирования и изготовления обнаруживаются со временем при воздействии среды эксплуатации. Они проявляются в форме снижения прочности и растрескивания бетона в результате воздействия окружающей среды, утраты защитного действия и коррозии стальной арматуры, что вызывает снижение несущей способности и эстетических качеств железобетонных конструкций. Такие изменения требуют выполнения ремонтных работ, что в разы увеличивает издержки по ремонту и эксплуатации данных зданий и сооружений [2].

При эксплуатации сооружений из цементных бетонов, подвергающихся постоянному воздействию жидкой среды содержащей вещества, способные вступать в химические реакции с цементным камнем, возникает проблема образования легкорастворимых продуктов реакции или веществ в порах цементного камня, уносимых с водой в виде амфотерных масс. Такие процессы способствуют инициации коррозии бетонов второго вида, а при наличии содержания сульфатов в жидкой среде – сульфатной или сульфаталюминатно-гипсовой коррозии (при концентрации сульфатов от 250–300 до 1000 мг/л развивается сульфатная коррозия бетонов, при содержании сульфатов более 1000 мг/л – сульфаталюминатно-гипсовая коррозия) [3].

Одним из наиболее сложных вопросов в изучении процессов коррозии является коррозия бетона в сульфатных средах. До недавнего времени основным способом защиты бетонов от сульфатной коррозии считалось уменьшение содержания алюминатной фазы в цементах, входящей в структуру эттрингита, что ограничивает его рост и обеспечивает достаточную долговечность бетона. Однако последние исследования показали недостаточность этого условия для защиты бетона вследствие образования при воздействии сульфатов наряду с эттрингитом и таумасита [4].

Основой большинства цементов является, как известно, портландцементный клинкер. Вводя модифицирующие добавки и нормируя минералогический состав, получают цементы, необходимые для использования их в различных условиях эксплуатации. Так, например, для повышения надежности, долговечности и улучшения эксплуатационных характеристик бетонных и железобетонных конструкций при сульфатной агрессии применяют ряд специальных цементов. К ним относят, в том числе, сульфатостойкие и напрягающие цементы.

Сульфатостойкие цементы применяют для особо тяжелых усло-

вий при наличии внешнего агрессивного воздействия. Сульфатостойкие цементы предназначены для бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях переменного уровня воды, а также сооружений, которые подвергаются агрессивному воздействию сульфатных вод при одновременном многократном изменении температуры или многократном увлажнении и высыхании.

Чаще всего используют сульфатостойкий портландцемент, полученный совместным помолом портландцементного клинкера и тонкомолотой минеральной добавки: трепела, опоки, диатомита (5–10%) или доменного гранулированного шлака (10–20%). Добавка связывает выделяющийся при гидратации алюмината гидрат окиси кальция, что способствует повышению сульфатостойкости цемента [2]. Использование добавок такого рода позволяет получать сульфатостойкий портландцемент высоких марок М400 и 500 даже с повышенным содержанием алюминатов. Например, сульфатостойкий шлакопортландцемент марки М300 и 400 получают при содержании алюминатов до 8%.

Сульфатостойкость цемента обеспечивается, прежде всего, минералогическим составом, в котором ограничивается содержание нестойких к сульфатной агрессии минералов. Сульфатостойкий портландцемент содержит 50% C_3S , 5% C_2A от 10 до 22% ($C_3A + C_4AF$) [1].

Сульфатостойкие портландцементы, с пониженным содержанием алюминатной фазы и с минеральными добавками, обеспечивают относительную устойчивость к агрессивным сульфатным водам при строгом минералогическом составе и при соблюдении ряда технологических факторов [5]: быстрое охлаждение клинкера, снижение тонкости помола и др.

Одним из основных вяжущих материалов, которые используются в производстве бетонов, является напрягающий цемент. Данный вид цемента является представителем расширяющих цементов. Расширяющиеся цементы, в отличие от традиционных, в процессе твердения увеличиваются в объеме, что и позволяет в значительной мере нейтрализовать влияние усадки, негативно влияющей на свойства бетона. Основу напрягающего цемента составляет портландцементный клинкер (около 2/3 состава), к которому при помоле добавляют повышенное по сравнению с портландцементом количество гипса, а также дополнительно высокоалюминатные шлаки.

Изучая сульфатостойкость цемента и далее бетона, необходимо рассмотреть требования, свойства и состав для бетонов гидротехнического назначения. Гидротехнические бетоны подразделяют на четыре марки: W2, W4, W6, W 8. Для гидротехнического бетона допускается применение портландцемента, пластифицированного и гидрофобного цементов, пуццоланового и шлакового и сульфатостойкого цемента с повышенным содержанием белита. Отмечается [6], что глиноземистый цемент, более чем портландцемент, стоек в растворах сульфата кальция и магния, а также в слабых растворах и парах неорганических кислот, в морской воде, в углекислых и болотных водах, в маслах. Изучением состояния бетонных гидротехнических конструкций занимался А.А. Байков, и что касается сульфатов, он отмечал образование лишь следов SO_4^{2-} , характеризующих присутствие малорастворимого гидросульфаталюмината кальция, что сопровождается значительным увеличением внутренних напряжений, вследствие чего масса бетона разрыхляется и становится сильно водопроницаемой. Однако потери при прокаливании полуазру-

Левчук Наталья Владимировна, к.т.н., доцент кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

Замировский А.В., студент строительного факультета Брестского государственного технического университета.

Василевская М.В., ассистент кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

шенного бетона составили в % отношении: вода, углекислый газ, органические примеси – 41,72; кремнезем – 5,37; оксиды алюминия и железа – 0,684; оксид магния 40,72; серный ангидрид – всего лишь 1,47. Содержание сульфатов в разрабатываемом бетоне может быть больше по сравнению с содержанием их в исходном портландцементе. Накопление сульфатов происходит в результате взаимодействия составляющих цементный камень с солями, содержащимися в воде, и, прежде всего, это соли магния. Накопление сульфатов также может быть обусловлено различной плотностью цементного камня и, если плотность бетона высока, диффузия солей замедляется. Соли магния (сульфаты) реагируют с гидроксидом кальция в поверхностном слое, а полученный гидроксид магния осаждается в поверхностном слое, создавая мембрану, через которую сульфат-ионы диффундируют вглубь бетона. Таким образом, количество сульфат-ионов в глубине конструкции растёт, возможен и обратный процесс выхода сульфат-иона в раствор.

В данной работе проводились исследования сульфатостойкости напрягающего бетона на основе цемента с добавкой, представляющей собой смесь метакалина ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) и гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Известно, что при гидратации цемента образование низкоосновных гидросиликатов кальция $[(1,8-2,4)CaO \cdot SiO_2 \cdot (1-1,25)H_2O]$ приводит к увеличению прочности цементного камня. Однако высокая стойкость цементов в сульфатных водах обусловлена тем, что в затвердевшем состоянии они содержат пониженное количество высокоосновных гидроалюмосиликатов кальция. В связи с этим нормируется количественный состав минеральных добавок, содержащих оксид алюминия (5–8% по массе вяжущего).

Сульфатоалюминатная коррозия является следствием взаимодействия гипса с высокоосновными алюминатами кальция, а присутствие в водном растворе Na_2SO_4 повышает растворимость $Ca(OH)_2$, который быстрее вымывается из бетона.

Сначала с гидроксидом кальция реагирует сульфат натрия, в последующем идет образование этtringита из гипса и алюмината кальция, вызывающего собственные напряжения и, как следствие, разрушение бетона.

Трехкальциевый алюминат в обычных условиях образует на начальной стадии $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (10-12)H_2O$, а в дальнейшем способен преобразовываться в $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$. При наличии в системе системы двуводного гипса трехкальциевый алюминат образует при обычных температурах гидросульфоалюминат $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3Ca_2SO_4 \cdot x \cdot 31H_2O$, но при пониженных концентрациях $Ca(OH)_2$ возникает, преимущественно, односульфатная форма $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca_2SO_4 \cdot 12H_2O$.

При гидратации портландцемента с водой в первую очередь реагируют с водой алюминаты кальция, одновременно с реакциями гидратации силикатов кальция проходят вторичные реакции образования гидросульфоалюминатов [3].

Методика исследований. В ходе исследований оценивалась сульфатостойкость трех составов бетонной смеси. В исследуемых составах бетонной смеси дополнительным источником гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция являлась вводимая добавка метакалина. Первый состав бетонной смеси используется для строительства гидротехнических сооружений, поэтому возникает необходимость оценки сульфатостойкости бетона на основе данного состава. Материал, полученный на основе третьего состава, представлял собой частный случай фибробетонов.

Состав бетонной смеси I: (напрягающий цемент / песок / щебень / вода): 1,000 / 2,125 / 2,625 / 0,472. Напрягающий цемент представлял собой смесь 9-ти частей портландцемента (марки СЕМ I 52,5 N по СТБ ЕН 197) и 1-й части добавки. Для достижения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси в неё вводился пластификатор СП-1, в количестве 7 литров на 1 м³ бетонной смеси.

Состав бетонной смеси II: (напрягающий цемент / песок / щебень / вода): 1,000 / 1,000 / 1,600 / 0,400. Напрягающий цемент пред-

ставлял собой смесь 75% портландцемента (марки ПЦ500-ДО по ГОСТ 10178-85), 13% метакалина и 12% гипса.

Состав бетонной смеси III: (напрягающий цемент / песок / щебень / вода): 1,000 / 1,000 / 1,600 / 0,400. Напрягающий цемент представлял собой смесь 75% портландцемента (марки ПЦ500-ДО по ГОСТ 10178-85), 13% метакалина и 12% гипса. Для увеличения трещиностойкости бетона в данный состав бетонной смеси вводилась базальтовая фибра, в количестве 1,5 кг на 1 м³ бетонной смеси.

Для исследования сульфатостойкости бетона на основе смеси данного состава использовался *ускоренный метод определения сульфатостойкости бетона* [7]. Метод основан на сравнении скорости поглощения агрессивных ионов SO_4^{2-} испытуемым бетоном и особо плотным бетоном повышенной сульфатостойкости, приготовленным из портландцемента по ТУ 21-21-10-80.

Для определения сульфатостойкости бетона были изготовлены образцы-кубки размерами 5х5х5 см в количестве 6-ти штук, набор прочности которых осуществлялся при нормальных условиях твердения. Затем образцы были помещены в эксикатор и залиты раствором сульфата натрия в количестве 5 л, приготовленным из расчета 2,8 г безводного сульфата натрия (Na_2SO_4) в 1 л дистиллированной воды.

После установки образцов в агрессивный раствор, в сроки, соответствующие 1, 3, 6, 9 и 12 неделям, из каждого эксикатора отбирались пипеткой пробы агрессивного раствора для определения ионов SO_4^{2-} в количестве 100 мл.

Для определения содержания в растворе сульфатных ионов в отобранную пробу исследуемого раствора в количестве 100 мл добавляли 1 мл концентрированной HCl и нагревали на плитке почти до кипения. В 25 мл 2,5 %-го раствора BaCl, нагретого до кипения, добавляли при помешивании исследуемый раствор и затем оставляли на теплой плитке на 3 ч, накрыв стакан с исследуемым раствором часовым стеклом. Охладив раствор до комнатной температуры, его фильтровали через плотный фильтр (осадок количественно переносили на фильтр и промывали теплой водой до исчезновения в промывных водах реакции на ион хлора (по азотнокислому серебру)). Фильтр с осадком переносили в тигель, высушивали в сушильном шкафу и прокаливали при температуре 800–900°C до постоянной массы. Содержание сульфатных ионов SO_4^{2-} в растворе $Q_{SO_4}^P$, мг/л, рассчитывали по формуле 1.

$$Q_{SO_4}^P = P_{oc} \cdot 41,15. \quad (1)$$

Количество ионов SO_4^{2-} (г), поглощенных бетоном, $Q_{SO_4}^6$ рассчитывают по формуле 2:

$$Q_{SO_4}^P = P_{oc} \cdot 41,15, \quad (2)$$

где C – концентрация исходного агрессивного раствора сульфата натрия, мг/л, в который были помещены образцы бетона, в пересчете на SO_4^{2-} .

Относительное количество ионов SO_4^{2-} в пересчете на SO_3 , поглощенное образцами, рассчитывали по формуле 3:

$$Q_{SO_3}^6 = \frac{Q_{SO_4}^6 \cdot 0,83}{P}, \quad (3)$$

где относительное количество агрессивных ионов, поглощенное бетоном, г/г; P – масса цементного камня в объеме всех образцов одного состава, установленных на испытание, г.

Полученные результаты. По результатам испытаний (таблица 1) были построены кривые поглощения бетонами составов I, II, III сульфатных ионов во времени относительно эталонной кривой поглощения сульфатных ионов (особо плотным бетоном повышенной сульфатостойкости), что отражено на рисунке 1, 2, 3. Испытания бетонов составов II и III еще ведутся, однако уже полученные результаты можно представить в виде кривой поглощения относительно эталона и прогнозировать ее положение за последующие периоды.

Таблица 1. Результаты исследования сульфатостойкости запроектированного состава бетонной смеси

Период отбора пробы агрессивного раствора, недели	1	3	6	9	12
Относительное количество SO_3 , поглощенное бетоном во времени, г/г	Состав бетонной смеси I				
	0,0067	0,0120	0,0150	0,0170	0,0180
	Состав бетонной смеси II				
	0,0103	0,0107	0,0108	0,0100	0,0112
	Состав бетонной смеси III				
	0,0105	0,0116	0,0115	0,0110	0,0113

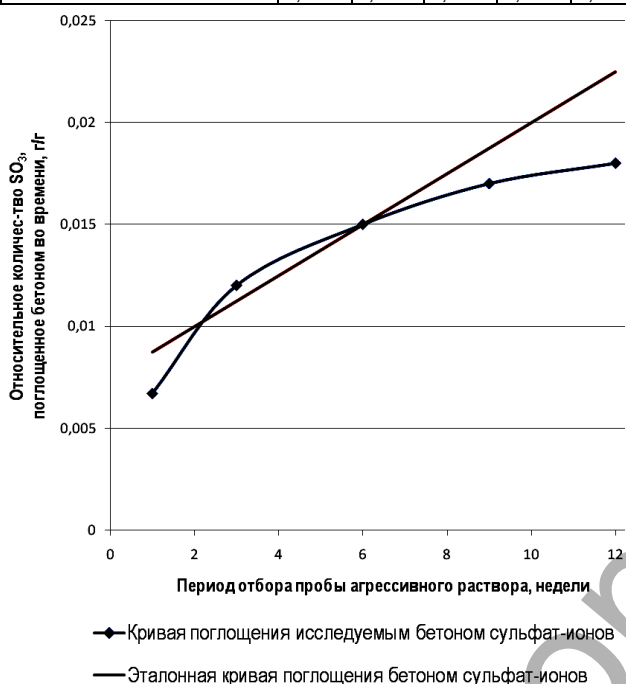


Рис. 1. Кривая поглощения бетоном состава I сульфатных ионов во времени относительно эталонной кривой поглощения сульфатных ионов

Анализ полученных результатов исследований позволил сформулировать следующие выводы по возможности использования данных составов бетонной смеси для изготовления конструкций, эксплуатируемых в сульфатной агрессивной среде:

Состав бетонной смеси I:

1. В период с первой по третью неделю выдержки образцов цементного бетона в агрессивной среде происходит интенсивное поглощение сульфатов из исходного раствора, приводящее к превышению значений сульфатостойкости бетона относительно эталонной кривой.
2. В период с шестой по седьмую неделю выдержки образцов процесс поглощения сульфатов замедляется и кривая поглощения сульфатов пересекает эталонную кривую.
3. За следующий период испытаний кривая поглощения сульфатов значительно ниже эталонной, что позволяет использовать данный состав бетона для изготовления сооружений, работающих в сульфатных средах, и считать бетон сульфатостойким.
4. Однако, исходя из теоретического материала и результатов исследований, в период с первой по седьмую неделю эксплуатации гидротехнического сооружения не рекомендуется подвергать бетон воздействию сульфатосодержащей жидкой среды, способствующей ускорению процессов коррозии бетона. В этот период содержание гидроксида кальция и гипса, как продукта перехода трехсульфатного гидроалюмината кальция в моносульфалюминат, в поровом пространстве бетона наиболее

высокое, а избыток алюминатов, возможно, приводит к образованию неустойчивых соединений.

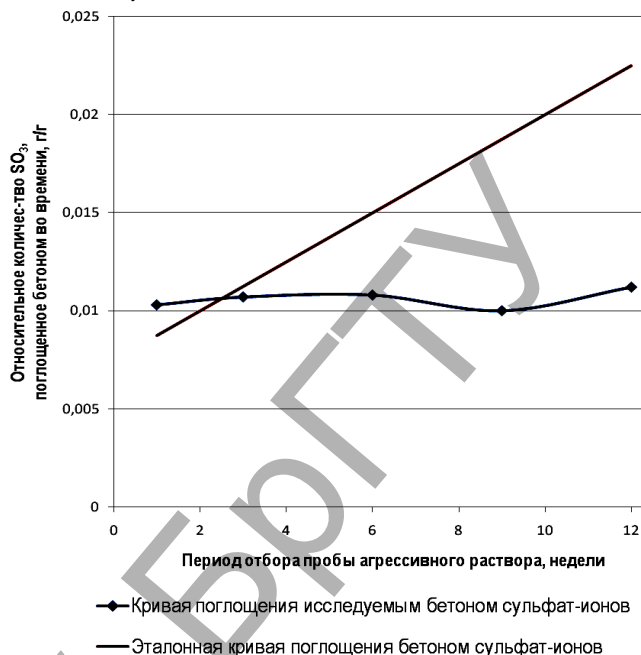


Рис. 2. Кривая поглощения бетоном состава II сульфатных ионов во времени относительно эталонной кривой поглощения сульфатных ионов

Состав бетонной смеси II:

Обработка полученных результатов на данном этапе позволила считать исследуемый бетон сульфатостойким и использовать для изготовления конструкций, работающих в сульфатных средах с концентрацией ионов SO_4^{2-} не более 2000 мг/л, поскольку кривая поглощения находится на диаграмме ниже эталонной кривой.

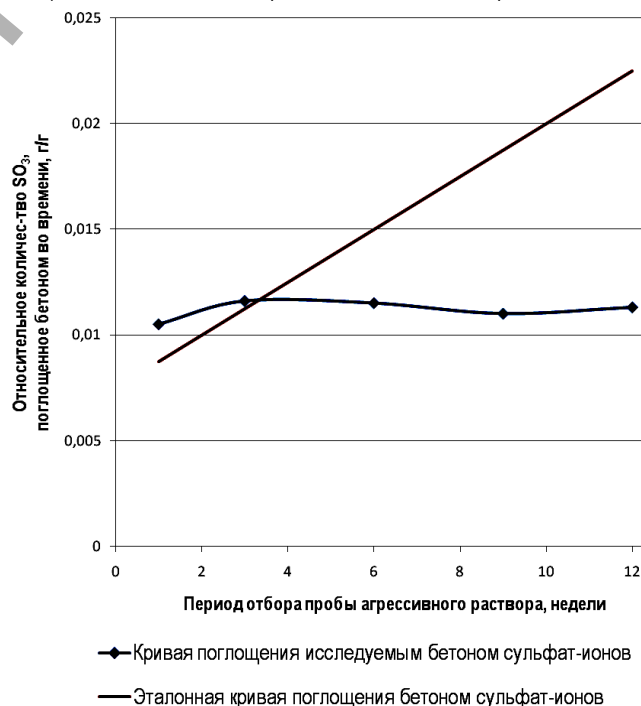


Рис. 3. Кривая поглощения бетоном состава III сульфатных ионов во времени относительно эталонной кривой поглощения сульфатных ионов

По результатам исследований по сульфатостойкости образцов II и III составов можно сделать следующие выводы:

1. Кривые поглощения сульфат-ионов в исследуемых образцах имеют нисходящие значения, т.е. за весь период вытяжки образцов в агрессивной среде SO_4^{2-} выделился во внешнюю среду. Это подтверждается увеличением массы осадка BaSO_4 .
2. Такой процесс можно объяснить, с одной стороны, добавкой гипса в бетонную смесь и накоплением его в поровом пространстве, с другой стороны, в связи с добавлением метакалина в бетонную смесь увеличивается образование частиц этtringита, который в дальнейшем вследствие перекристаллизации приводит к усилению взаимодействия воды и цемента и увеличению сульфатных новообразований.
2. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. – М.: Изд. АСВ, 2003. – 500 с.
3. Левчук, Н.В. Влияние внешних экологических факторов на бетонные конструкции: материалы Международн. науч.-практ. конф., Брест, 18-20 апр. 2012 г. // УО «Брестск. гос. техн. ун-т»; под ред. А.А. Волчека [и др.]. – Брест, 2012. – 208 с.
4. Федосов, С.В. Сульфатная коррозия бетона / С.В. Федосов, С.М. Базанов. – М.: Изд. АСВ, 2003. – 192 с.
5. Сулименко, Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе / Л.М. Сулименко. – М.: Высшая школа, 2000 – 302 с.
6. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. – М: Стройиздат, 1986 – 463 с.
7. Рояк, Г.С. Рекомендации по способам защиты бетона в условиях сульфатной агрессии / Г.С. Рояк, И.В. Грановская, Т.Л. Трактирниковая. – М., 1984.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов / Под общ. ред. Москвина – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

Материал поступил в редакцию 03.02.16

LEVCHUK N.V., ZAMIROVSKI A.V., VASILEVSKAYA M.V. Determination of sulfate resistance of concrete on the basis of the straining cements

In this article there are presented the results of the research on sulphateresistance of concrete based on self-stressing cement. The accelerated methods used here were worked out by TSNiIS.

УДК 624.15.

Черноуван В.Н., Черноуван Н.В., Черноуван А.В.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

Сегодня разработано достаточно большое количество эффективных конструктивных решений теплых полов по грунту и решена технология их устройства [1, 2]. Однако устройство теплого пола по грунту является достаточно трудоемким технологическим процессом, включающим большую номенклатуру строительных работ. Наиболее трудоемкими из них являются: подсыпка и уплотнение грунта под полы, устройство подготовки под полы, которая включает устройство бетонного основания, укладку рулонной гидроизоляции и слоя теплоизоляционного материала, выравнивающей армированной стяжки под напольное покрытие.

Как показывает практика, в последнее время для решения проблемы снижения потерь тепла через полы по грунту при возведении как одноэтажных, так и многоэтажных жилых зданий и сооружений без подвалов или с цокольным этажом массово применяют монолитные плитные фундаменты. Наличие в конструкции этих фундаментов слоя теплоизоляции позволяет без дополнительных технологических операций обеспечить требуемое термическое сопротивление теплопередаче полов по грунту.

Учитывая большие нагрузки, передаваемые на монолитные плитные фундаменты надземной частью эксплуатируемых зданий и сооружений, рекомендуется в качестве теплоизоляции применять плитный экструдированный пенополистирол. Водопоглощение по объему утеплителя не более 0,2%. Он не гниет и имеет высокие эксплуатационные характеристики. Расчетное значение коэффициента теплопроводности его равно 0,033...0,036 Вт/(м·°С). Плитный экструдированный пенополистирол имеет прочность на сжатие, при 10% линейной деформации, не менее 400 кПа, что позволяет применять его в фундаментах высотных зданий и сооружений.

Монолитные плитные фундаменты являются разновидностью мелкозаглубленных фундаментов. Закладываются они на глубину 40...50 см от поверхности земли. От незаглубленных ленточных фун-

даментов они отличаются тем, что плитные основания жестко армируются по всей плоскости. Армирование монолитных фундаментных плит вязанными или сварными каркасами по всей плоскости позволяет обеспечить совместную работу фундамента с грунтовым основанием и тем самым избежать разрушения тела фундаментной плиты при деформациях грунта основания фундамента при замерзании или оттаивании грунта. Совместность работы фундаментной плиты с грунтовым основанием позволяет эффективно применять монолитные фундаментные плиты при больших нагрузках на фундамент (высотные здания), при строительстве на слабых и неравномерно сжимаемых грунтах, в сейсмически активных районах.

На сегодня разработано несколько конструктивных решений монолитных фундаментных плит. Классическим решением является конструкция монолитной фундаментной плиты, приведенная на рисунке 1.

Наиболее эффективной и апробированной на практике является следующая технология устройства монолитных фундаментных плит [3]. Бульдозером выполняется снятие плодородного слоя грунта на строительной площадке и перемещение его к месту хранения (п. 13.5 [4]). Разработку грунта в котловане, ввиду его не большой глубины (не более 50 см), с экономической точки зрения целесообразно выполнять комплектом землеройных машин в составе: бульдозер и одноковшовый экскаватор. Рекомендуется следующая последовательность производства земляных работ при устройстве котлована. Бульдозер выполняет непосредственно послынную срезку грунта в котловане до проектной отметки и перемещает его от центра котлована к его бровке, формируя кавальер. Грунт из сформированных бульдозером у бровки котлована кавальеров экскаватором «прямая лопата» грузится в автотранспорт и вывозится за пределы строительной площадки. После завершения работ по отрывке котлована приступают к устройству песчанной (противопучинистой) подушки. Песчаная подушка выполняется толщиной 250 мм из смеси щебня

Черноуван Вячеслав Николаевич, к.т.н., профессор, профессор кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета

Черноуван Николай Вячеславович, к.т.н., доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Черноуван Анна Вячеславовна, к.т.н., старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.