

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-04>

EDN GEXBOW

Оригинальная статья / Original paper



Разработка и проектирование вентиляторной градирни АЭС

С.С. Сиятнникова ✉, М.М. Бакланов, С. М. Бурдаков , Ю.В. Заяров 

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

✉ sneiany25@inbox.ru

Аннотация. Одним из методов повышения надежности эксплуатации объектов атомной энергетики является повышение эффективности работы системы контурного охлаждения реакторно-энергетического оборудования (РЭО) атомных электростанций (АЭС). Важнейшим элементом системы контурного охлаждения является башенная испарительная градирня (БИГ). Эффективность ее работы очень сильно зависит от климатической обстановки при эксплуатации в южных, тропических условиях Российской Федерации и за рубежом, особенно в условиях мирового глобального потепления и развития атмосферного парникового эффекта. Для компенсации климатического фактора эксплуатации стандартной конвекционной градирной установки, возможно дополнительно вводить охлаждающие мощности в виде малогабаритных, высокоэффективных вентиляторных градирен (ВИГ) с принудительным охлаждением. Исходя из существующих проектных решений для обеспечения стабильной работы охлаждающей системы РЭО необходимо установить 10-15 ВИГ около одной БИГ, в связи с чем появляется потребность в разработке отдельных фундаментов и проведение особых земляных работ для каждой ВИГ. В дополнении к вышесказанному, ВИГ – система, с потенциалом в модернизации оборудования (оросителей, двигателей, рабочих колес, водоуловителей), что может привести к увеличению постоянных или динамических, в основном, вибрирующих нагрузок от работы вентиляторов, уменьшая несущую способность фундамента. Во избежание снижения несущей способности, а также его перегрузки, необходимо провести мероприятия по его усилению в соответствии с нормативно-техническими требованиями. В рамках данной работы был проведен анализ нагрузок действующих на фундамент ВИГ, разработана его расчетная схема. На основании литературного обзора предложено два альтернативных варианта усиления фундамента ВИГ для обеспечения перспективного апгрейда оборудования с увеличенным весом. На основании анализа разработанной расчетно-аналитической модели определено, что нагрузки с центра фундамента, благодаря предложенным вариантам усиления фундамента ВИГ, перераспределились по краям, уменьшив максимальное нагружение в 5 раз. Показано, что второй вариант усиления арматурной сеткой выигрывает экономически, по сравнению с первым вариантом (усиление сортовыми, прокатными элементами), удешевляя проведение работ по разработке фундамента в 1,2 раза.

Ключевые слова: вентиляторная градирня, вентилятор, атомная электростанция, усиление, фундамент, глобальное потепление, принудительное охлаждение, тепловлаagoзащитные экраны, реакторно-энергетическое оборудование, расчетно-аналитическая модель.

Для цитирования: Сиятнникова С.С., Бакланов М.М., Бурдаков С.М., Заяров Ю.В. Разработка и проектирование вентиляторной градирни АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(2):36-45. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-04>

For citation: Sinyatnikova S.S., Baklanov M.M., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. Development and design of a fan cooling tower for a nuclear power plant. *Nuclear Safety*. 2025;15(2):36-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-02-04>

Development and design of NPP fan cooling tower

Snezhana S. Sinyatnikova ✉, Mikhail M. Baklanov, Sergey M. Burdakov ,
Yuriy V. Zayarov 

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*

✉ sneiany25@inbox.ru

Abstract. One of the methods of improving the reliability of nuclear power facilities is to increase the efficiency of the loop cooling system for reactor-power equipment (RPE) of nuclear power plants (NPP). The most important element of the loop cooling system is the evaporative cooling tower (ECT). The effectiveness of its work very much depends on the climatic situation, when operating in the southern, tropical conditions of the Russian Federation and abroad, especially in conditions of global warming and the development of the atmospheric greenhouse effect. To compensate the climatic factor of standard convection cooling tower operation, it is possible to additionally introduce cooling powers in the form of small-sized, highly efficient fan cooling towers with forced cooling. Based on the existing design solutions, to ensure the stable operation of the RPE cooling system, it is necessary to install 10-15 fan cooling towers near one evaporative cooling tower. There is a need to develop separate foundations and carry out special earthworks for each fan cooling tower. In addition to the above, fan cooling tower is a system with the potential to modernize equipment (sprinklers, motors, impellers, water traps), which can lead to an increase in constant or dynamic (mainly vibrating loads from fan operation), reducing the bearing capacity of the foundation. In order to avoid a decrease in bearing capacity, as well as its overload, it is necessary to take measures to strengthen it in accordance with regulatory and technical requirements. As part of this work, the loads acting on the fan cooling tower foundation are collected, its design scheme is developed. Based on the literary review, two alternative options to strengthen the fan cooling tower foundation are proposed to ensure a promising upgrade of equipment with increased weight. Based on the analysis of the developed computational and analytical model, it is determined that the loads from the center of the foundation, due to the proposed options to strengthen the fan cooling foundation, are redistributed along the edges, reducing the maximum load by 5 times. It is shown that the second option of mesh reinforcement benefits economically compared to the first option (reinforcement with high-quality, rolling elements), reducing the cost of foundation development by 1.2 times.

Keywords: fan cooling tower, fan, nuclear power plant, reinforcement, foundation, global warming, forced cooling, heat and moisture shields, reactor and power equipment, calculation and analytical model.

Одним из методов повышения надежности эксплуатации объектов атомной энергетики является повышение эффективности работы системы контурного охлаждения реакторно-энергетического оборудования (РЭО) атомных электростанций (АЭС).

Важнейшим элементом системы контурного охлаждения является башенная испарительная градирня (БИГ). Эффективность ее работы очень сильно зависит от климатической обстановки при эксплуатации в южных, тропических условиях Российской Федерации и за рубежом, особенно в условиях мирового глобального потепления и развития атмосферного парникового эффекта. Для компенсации климатического фактора эксплуатации стандартной конвекционной градирной установки возможно дополнительно вводить охлаждающие мощности в виде малогабаритных, высокоэффективных вентиляторных градирен (ВИГ) с принудительным охлаждением.

Согласно официальному докладу об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г., с середины 1970-х гг. рост среднегодовой температуры на территории Российской Федерации превосходит глобальную температуру в 2,5 раза, отмечая, что каждое десятилетие, вне зависимости от сезона, становится теплее предыдущего¹.

Чем выше температура наружного воздуха, тем слабее процесс охлаждения, и тем хуже справляется башенная градирня, особенно в летние периоды. Существует множество способов решить данную проблему: заменить водоуловители, оросители; ввести

¹ Бардин М.Ю., Козлова Е.Н., Платова Т.В. [и др.]. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2025. – 104 с. – Режим доступа: https://meteof.gov.ru/press/news/39990/?sphrase_id=933078 (дата обращения: 21.05.2025). ISBN 978-5-906099-58-7

в эксплуатацию дополнительную башенную градирню, установить жалюзи. Однако, все эти способы предполагают значительное вмешательство в работу градирни, требуя временно приостановить ее работу для модернизации и введения дополнительных технологических решений, что может быть невозможно во время продолжительной жары. Проектирование дополнительной БИГ потребует больших демонтажных и реконструкционных работ в уже действующих атомных станциях.

Как отмечает Еперин А.П. [1], для эксплуатируемых АЭС вентиляторные градирни можно использовать наряду с испарительными градирнями мокрого типа для охлаждения технической воды атомных энергетических станций. Так же автор рассмотрел перспективы применения этих градирен для строящихся или ожидающих в очереди проектов АЭС.

Опыт использования таких тамденных решений имеется. Согласно официальной информации АО «Концерн Росэнергоатом»², 20 января 2022 г. на Ростовской АЭС ввели в промышленную эксплуатацию вентиляторные градирни для энергоблока №3.

Основное отличие вентиляторных градирен от башенных заключается в том, что для обеспечения необходимого расхода воздуха в атмосферу для охлаждения используются вентиляторы. В данном случае, необходимая для охлаждения жидкость вначале разбрызгивается на оросителе для последующего стекания в накопитель. За счет постоянной работы вытяжного вентилятора воздух для охлаждения идет вверх, а для предотвращения значительных водопотерь в конструкцию монтируют каплеуловитель, находящийся непосредственно на пути воздушного потока.

В технологическом процессе охлаждения воды участвует следующее оборудование: электродвигатель, рабочее колесо, диффузор, водоуловитель, система водораспреде-

ления, оросительная система. Все это в процессе эксплуатации может сломаться или технически устареть, требуя замены на оборудование, с превосходящей массой. И если в процессе эксплуатации по различным причинам потребуется замена оборудования на более металлоемкое, то это может привести к ослаблению несущей способности фундамента, а то и к его разрушению [2].

Для данной работы была разработана трехсекционная, трехэтажная градирня, размером по осям 1-13/А-Д: 48,00х16,00м. Для данной ВИГ потребуется котлован, площадью 928,00 м². На основании технического задания необходимо установить более десяти ВИГ непосредственной близости от башенной градирни. На основании геологических данных изыскания в месте заложения ВИГ грунты, как правило, не равномерны. Глубины заложения, плотность, водонасыщенность и другие физико-механические свойства могут сильно отличаться в пределах небольшой территории. Следовательно, под каждую вентиляторную градирню надо разрабатывать отдельный фундамент с разной глубиной заложения, длиной, толщиной. Целесообразно разработать унифицированный фундамент, который сможет справиться не только со слабыми грунтами, но и с потенциальным апгрейдом оборудования.

Исходя из описанной выше проблемы, была поставлена цель: разработать и спроектировать ВИГ на территории АЭС с усиленным фундаментом на слабых грунтах с возможностью модернизации и замены оборудования.

Под «слабыми грунтами» понимаются сильно сжимаемые, перенасыщенные водой, высокопористые, рыхлые, заторфованные грунты, находящиеся в текуче-пластичном, текучем состоянии, обладающие низкой прочностью и вязкостью, сильно затрудняющие процесс строительства [3,4].

Были приняты следующие объемно-планировочные решения. Кровля вентиляторной градирни выполнена из металлических листов с рифлением в виде зерен на одной стороне, а другая сторона гладкая. Такие листы обладают высокой коррозионной стойкостью и не боятся влаги. Укладывать листы необходимо от правого края к левому в спе-

² На Ростовской АЭС ввели в промышленную эксплуатацию вентиляторные градирни для энергоблока № 3. – Режим доступа: https://rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-rostovskoy-aes/press-tsentr/novosti/40212/ (дата обращения: 21.05.2025).

циальные выемки по краям модулей внахлест. Сначала элементы соединяют между собой по кромке, а после фиксируют по всей поверхности. Листы монтируются на металлические элементы перекрытия винтовым соединением.

По конструкционному типу кровля плоская, по периметру огражденная из профилированных труб, а со стороны фасадов А-Д и Д-А предусмотрены дополнительные выходы на кровлю, в виде металлических лестниц. Между осями Г-Д расположены люки выхода на кровлю, предназначенные для выполнения рабочими работ по ремонту и уходу за сооружением на кровле. Каркас здания выполнен из металлоконструкций, предназначенных для размещения всех ключевых установок градирни. Основными компонентами каркаса являются сборные металлические изделия из стали марки С235, соединенные между собой с помощью болтовых соединений. Колонны представляют собой двутавры марки 20К1, длиной 9 метров. Стропильные конструкции выполнены из металлических профилей–балок 80х4. Распорки выполнены из металлических балок длиной 3,4 м, отличающиеся сечением по этажности. На отметке 0,000 использовался швеллер 12 П. На отметке +3,200

и +6,000 применен двутавр 20Б1. На отметке +9,000 использован двутавр 10Б1. Шаг металлических колонн равен пролету здания – 4 метра. Отметка низа стального каркаса находится на отметке 0,000. В подпористельном пространстве с отметки 0,000 на осях 1-13 и 13-1 сконструирована ветровая перегородка высотой 2,68 м. На этих же осях на фасаде сконструированы водоотводящие козырьки по всей длине. Межсекционные перекрытия служат для размещения на них оборудования и элементов кровли. Основными его составными частями служат стальные профили 75х4 предварительно оцинкованные от коррозионного воздействия. Тепловлагозащитные экраны и обшивка фасада градирни – элементы сооружения, выполнены из стеклопластикового профиля 40х40мм (толщина стенок 3х3х3х5 мм). Их установке предшествует монтаж металлического профиля С44-1000 толщиной листа 0,5 мм. На этапе изготовления металлические изделия подвергаются обязательному цинкованию поверхности для защиты металла от окисления.

Оборудование на Ростовской атомной электростанции было заменено его более мощным аналогом. Общая масса всех элементов ВИГ приведена в таблице 1.

Таблица 1. Общая масса всех элементов и оборудования ВИГ

Table 1. Total weight of all elements and equipment of the fan cooling tower

Наименование	Масса, т	Нагрузка, кН
Металлические колонны	24,22	237,60
Металлические балки	38,28	375,53
Металлические раскосы	10,23	100,36
Межсекционные перекрытия	9,5	93,20
Обшивка фасада градирни	0,95	9,32
Тепловлагозащитный экран	0,95	9,32
Профлисты	4,86	47,68
Обшивка кровли	10,71	105,07
Металлические лестницы	1,32	12,95
Металлическое ограждение	1,93	18,93
Капле-плечный ороситель	23,42	229,75
Водоуловитель сетчатый	4,3	42,18
Электродвигатель ВАСО 16-34-24 (3 шт.)	11,52	113,01
Рабочее колесо РК 50-6 (3 шт.)	0,75	7,36
Диффузор КВ-70/12 (3 шт.)	2,52	24,72
Всего:	145,46	1426,96

Фундамент ВИГ – это основание, которое служит для установки и обеспечения надежной работы объекта проектирования³ [5]. Он представляет собой железобетонную конструкцию в форме чаши с железобетонными колоннами внутри, служащими опорой для стальных колонн. Весь фундамент укреплен арматурной сеткой, которая связывает все элементы в одно целое и обеспечивает прочность и устойчивость конструкции. Над фундаментом располагается бассейн, который используется для сбора охлажденной воды.

С помощью программного продукта ПК ЛИРА-САПР и на основании исходных

данных таблицы 1 были рассчитаны усилия в стержнях фундамента. Расчетная схема показана на рисунке 1.

Бетонная подготовка В12,5, толщина – 100 мм, размер 49,6x17,6 м.

Фундаментная плита В25, W8, F200, толщиной 800 мм 49,4x17,4 м.

ЖБ колонны сечением 500x500 мм высотой 3820 мм.

ЖБ стенки чаши В25, W8, F200, толщина: 0,45 м 49,4 м и 17,4 м.

Внутренняя бетонная подложка В15, W6, F150 – 1520 мм.

Коэффициент Пуассона для железобетона $\nu=0,2$.

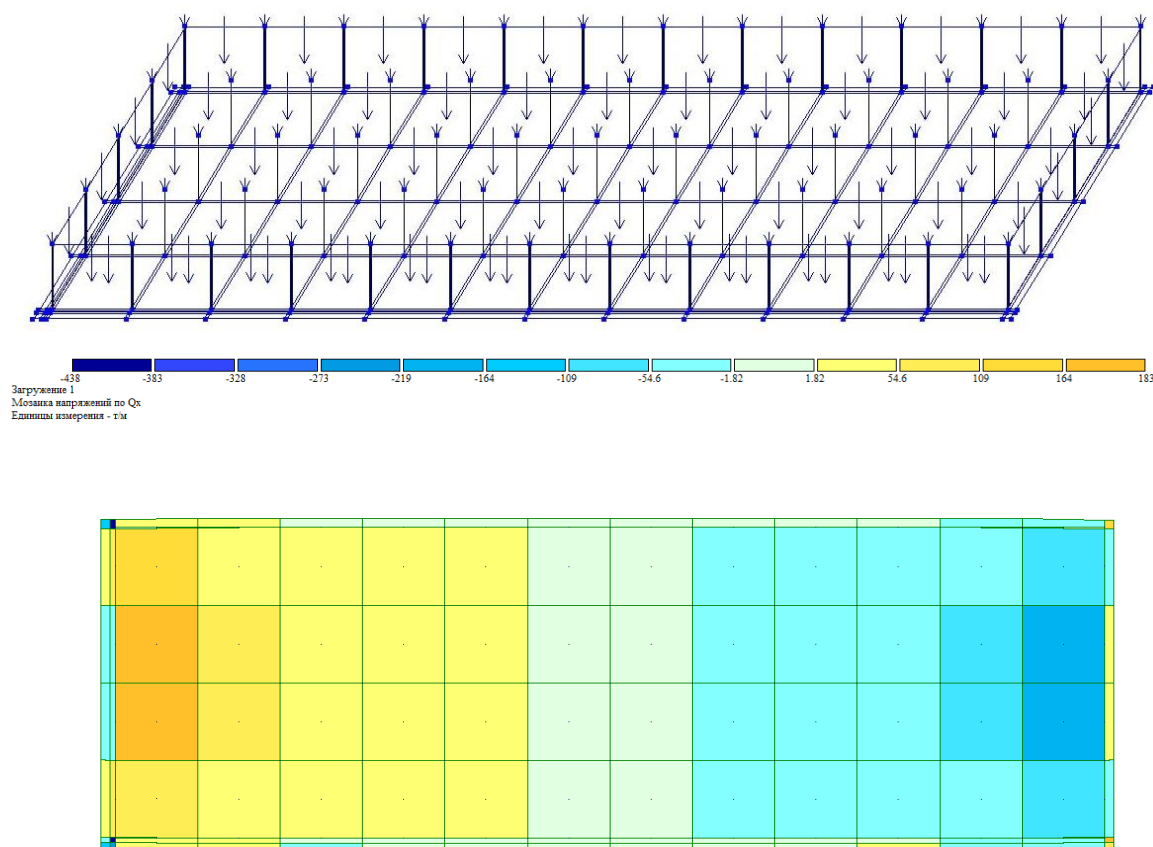


Рисунок 1. Схема нагружение фундамента без усиления
Figure 1. Diagram of foundation loading without reinforcement

³ СП26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. – Официальный сайт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/1865/> (дата обращения: 21.05.2025).

Согласно расчету, максимальное нагружение составляет 4364кН/м и распределено по бокам фундамента.

В рамках данной работы было предложено два альтернативных варианта фундамента ВИГ.

Для усиления фундамента может быть предложен способ, при котором в уже существующий фундамент вводят траверсы, представляющие собой двухконсольные

балки, а с двух сторон устанавливают железобетонные полосы из двутавров, которые впоследствии бетонируют [6,7]. По периметру плитного фундамента возводится армированный железобетонный пояс из двух швеллеров марки 12, а вдоль колонн – сетки из швеллеров 10. Бетонируется конструкция мелкозернистым бетоном для предотвращения коррозии, а армопояс опирается об толстую бетонную подложку^{4,5} (рис. 2).

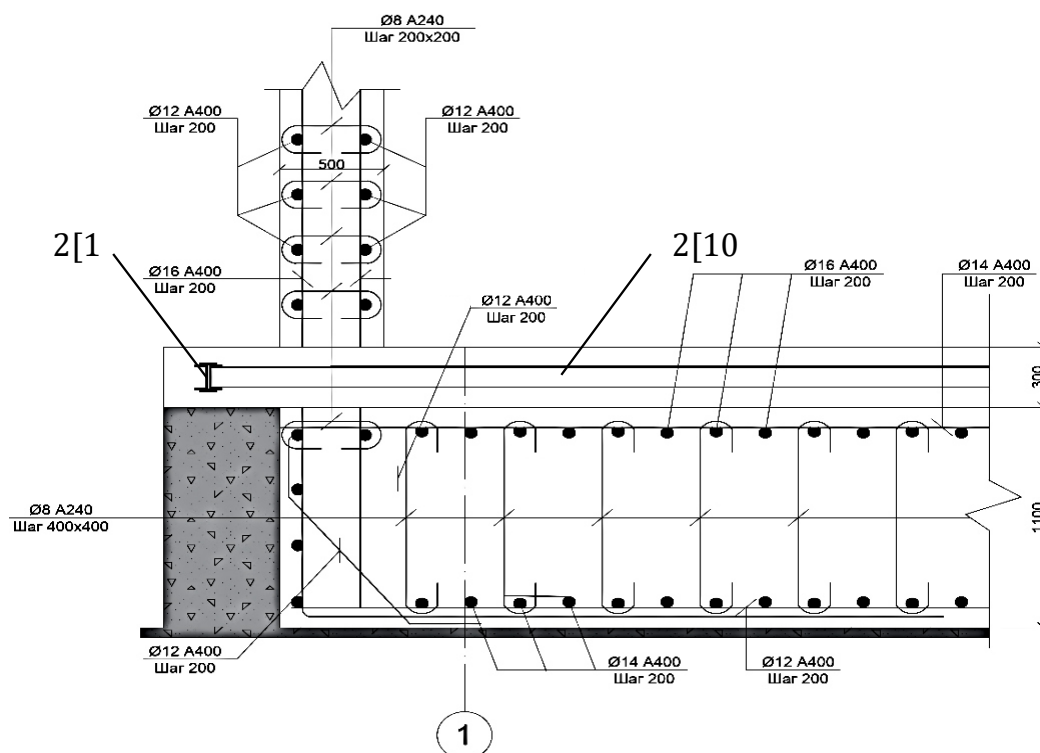


Рисунок 2. Узел сопряжения стены и дна методом усиления плитного фундамента бетонированием полос из железобетона с двух сторон

Figure 2. Joint between wall and bottom by reinforcement of slab foundation by concreting reinforced concrete strips on both sides

В среде ПК ЛИРА-САПР была разработана расчетно-аналитическая модель, которая позволила определить, что благодаря предложенному усилению фундамента

ВИГ нагрузки с центра перераспределились по краям, уменьшив максимальное нагружение в 5 раз (рис. 3).

⁴ СП 18.13330.2019 «Производственные объекты. Планировочная организация земельного участка» (СНиП П-89-80* «Генеральные планы промышленных предприятий»). – Официальный сайт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/57421/> (дата обращения: 21.05.2025).

⁵ СП63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Официальный сайт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/1887/> (дата обращения: 21.05.2025).

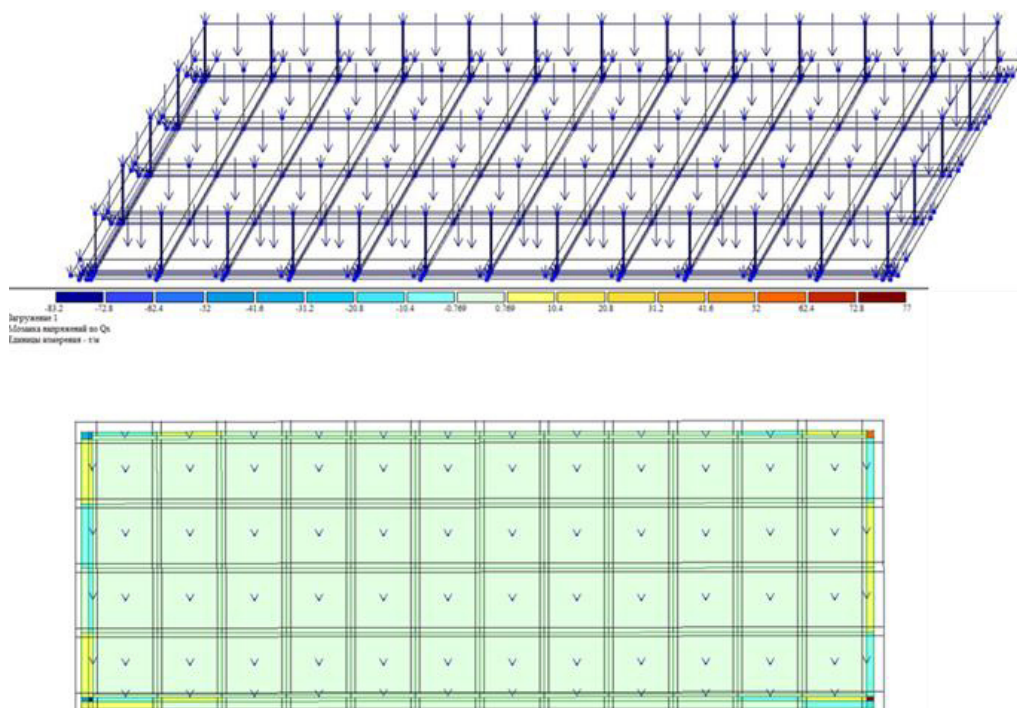


Рисунок 3. Схема нагружения усиленного фундамента методом усиления плитного фундамента бетонированием полос из железобетона с двух сторон

Figure 3. Scheme of loading reinforced foundation by reinforcement of slab foundation by concreting reinforced concrete strips on both sides

Однако данный метод обладает множеством существенных конструктивных недостатков. Места соединения швеллеров вдоль одной линии весьма уязвимы для прогибов, замена сломанного элемента может потребовать сложных и дорогостоящих работ по демонтажу [8,9]. Так же следует отметить, что применение подобных элементов, в качестве армирующих требует проведение сборочно-сварочных работ с последующей защитой сварных соединений антикоррозионными составами [10].

Вследствие этих недостатков был разработан альтернативный второй вариант усиления, в котором металлические изделия и бетонная подушка заменены арматурной сеткой стали А400, соединяющие днище бассейна с усилением единой конструкцией⁶ (рис. 4).

В качестве основной арматуры для днища и усиления используется продольная арматура Ø16мм, А400 с шагом 200 мм, а поперечная Ø14мм, А400 с шагом 200 мм. В местах усиления, в центре сетки в три ряда - арматура Ø8мм, А240 с шагом 400х400мм. Для стенок применяется арматура Ø12мм, А400 шагом 200 мм, с креплением к днищу единой связкой арматурой Ø16мм, А400 с шагом 200 мм. В колоннах – продольная арматура Ø8мм, А240 шагом 200 мм, а поперечная Ø22мм, А400 шагом 200 мм.

Проведенный анализ предложенных вариантов усиления фундамента ВИГ не выявил существенных изменений нагружения. Однако, второй вариант усиления арматурной сеткой выигрывает экономически, по сравнению с первым вариантом, удешевляя проведение работ по разработке фундамента в 1,2 раза.

⁶ Производительность – ручная дуговая сварка. – Большая энциклопедия нефти и газа. – Режим доступа: <https://ngpedia.ru/id333552p1.html> (дата обращения: 21.05.2025).

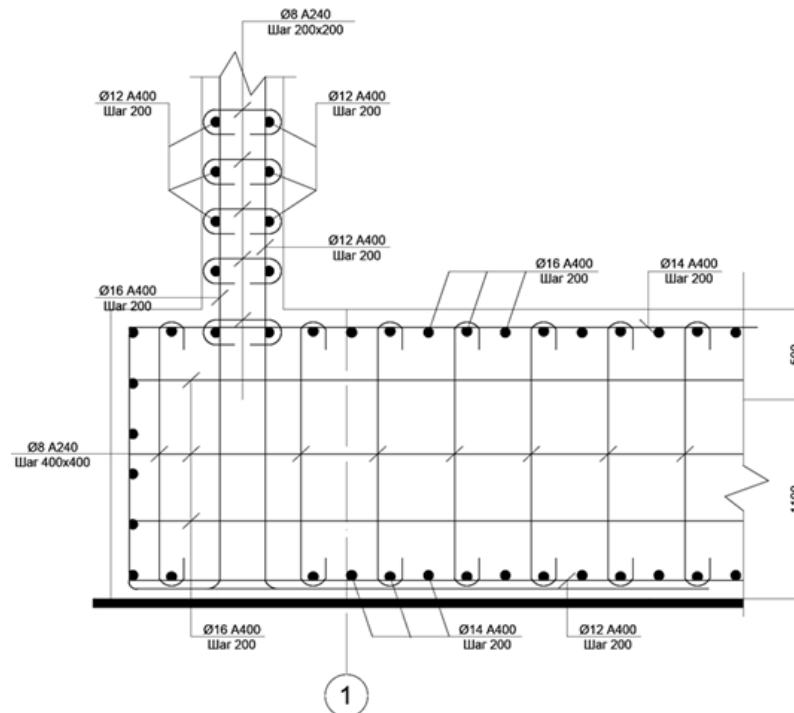


Рисунок 4. Узел сопряжения стены и дна с усиленным фундаментом с помощью арматуры
Figure 4. Joint between wall and bottom with reinforced foundation using reinforcement

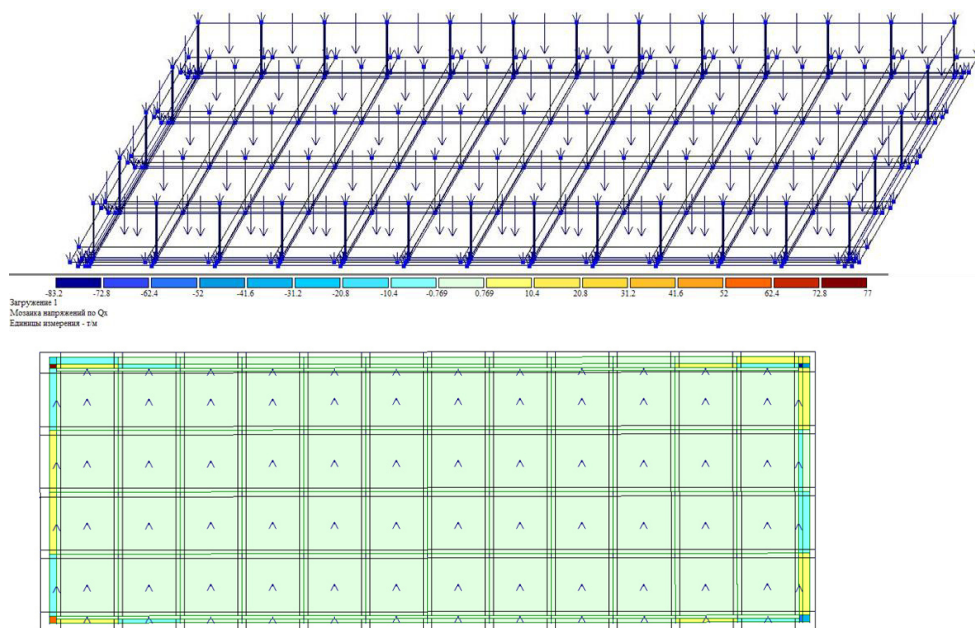


Рисунок 5. Схема нагружения усиленного фундамента с помощью арматуры
Figure 5. Reinforced foundation loading diagram using reinforcement

Предложенные конструктивные решения позволили спроектировать вентиляторную градирню с усиленным фундаментом на слабых грунтах с возможностью замены оборудования. Таким образом, для существующих и строящихся ВИГ, с учетом сложной геологической обстановки предлагается два варианта усиления фундаментов. Оба варианта

усиления позволяют значительно разгрузить фундамент. При этом первый вариант с использованием швеллеров предпочтительно применять для усиления уже существующих и эксплуатируемых фундаментов ВИГ. Второй же вариант можно рекомендовать как для существующих, так и для вновь возводимых ВИГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Еперин А.П. О проблеме охлаждения технической воды атомных электрических станций. *Биосфера*. 2011;3(1):38–40. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519981> (дата обращения: 21.05.2025).
- Eperin A.P. On the problem of cooling service water of nuclear power plants. *Biosphere*. 2011;3(1):38–40. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519981> (accessed: 21.05.2025).
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 376 с. ISBN 5-283-00284-5. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000601029?ysclid=mbyx1tkdlw354768798> (дата обращения: 22.05.2025).
- Ponomarenko V.S., Arefev Yu.I. Industrial and energy cooling towers enterprises. Moscow: Energoatomizdat. 1998. 376 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000601029?ysclid=mbyx1tkdlw354768798> (accessed: 22.05.2025).
3. Гильман Я.Д. Усиление и восстановление зданий на лессовых просадочных грунтах. Москва: Стройиздат, 1989. 159 с. ISBN 5-274-00271-4. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001459733?ysclid=mbyx3bcp42570734281> (дата обращения: 21.05.2025).
- Gil'man Ya.D. Reinforcement and restoration of buildings on loess collapses soil. Moscow. Stroyizdat. 1989. 159 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001459733?ysclid=mbyx3bcp42570734281> (accessed: 21.05.2025).
4. Калинин А.А. Обследование, расчет и усиление зданий и сооружений. Москва: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. 60 с. ISBN 5-93093-113-5. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000958616?ysclid=mbyx5cwy70699753015> (дата обращения: 21.05.2025).
- Kalinin A.A. Inspection, calculation and reinforcement of buildings and structures. Moscow. Izdatel'stvo as-sotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2004. 160 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000958616?ysclid=mbyx5cwy70699753015> (accessed: 21.05.2025).
5. Сотников С.Н. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений : опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР. Под ред. канд. техн. наук С. Н. Сотникова. Москва: Стройиздат, 1986. 96 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/QJwy7yYkzzFgH?ysclid=mbyu5wpmjy87026406> (дата обращения: 22.05.2025).
- Sotnikov S.N. Design and erection of foundations near existing ones facilities: construction experience in the North-West of the USSR. Moscow. Stroyizdat. 1986. 96 p. (in Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/QJwy7yYkzzFgH?ysclid=mbyu5wpmjy87026406> (accessed: 22.05.2025).
6. Швец В.Б. Усиление и реконструкция фундаментов. Москва: Стройиздат, 1985. 203 с. Режим па: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001261292?ysclid=mbyx7qou6e873965572> (дата обращения: 21.05.2025).
- Shvets V.B. Reinforcement and reconstruction of foundations. Moscow. Stroyizdat. 1985. 203 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001261292?ysclid=mbyx7qou6e873965572> (accessed: 22.05.2025).
7. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. Москва: Стройиздат. 1965. 342 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006450094?ysclid=mbyujk98vh121777741> (дата обращения: 23.05.2025).
- Onufriev N.M. Reinforcement of reinforced concrete structures of industrial buildings and constructions. Mos-cow. Stroyizdat. 1965. 342 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006450094?ysclid=mbyujk98vh121777741> (accessed: 23.05.2025).
8. Горохов Е.В., Брудка Я., Лубиньски М. и др. Долговечность стальных конструкций в условиях рекон-струкции Под ред. Е.В. Горохова. Москва : Стройиздат, 1994. 482с. ISBN 5-274-01406-2. Режим па: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001730302?ysclid=mbyusm86e645440659> (дата обращения: 22.05.2025).
- Gorokhov E.V., Brudka Ya., Lubin'ski M. [et al.] Durability of steel structures under reconstruction. Moscow. Stroyizdat. 1994. 482 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001730302?ysclid=mbyusm86e645440659> (accessed: 22.05.2025).
9. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н. [и др.] Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий. Под ред. А. И. Кикина. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Стройиздат, 1984. 302 с. Ре-жим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001227371?ysclid=mbyuv1c0va60551956> (дата обращения: 23.05.2025).
- Kikin A.I., Vasil'ev A.A., Koshutin B.N. [et al.] Increased durability metal structures of industrial buildings. Moscow. Stroyizda. 1984. 302 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001227371?ysclid=mbyuv1c0va60551956> (accessed: 23.05.2025).
10. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат, 1982. 120 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162?ysclid=mbyuzycpc4666683794> (дата обра-щения: 26.05.2025).
- Khromchenko F.A. Reliability of welded joints of boiler pipes and steam pipelines. Moscow. Energoizdat. 1982. 120 p. (in Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162?ysclid=mbyuzycpc4666683794> (ac-cessed: 26.05.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Синятникова С.С. – разработка теории, планирование и проведение расчетов, выполнение анализа результатов, разработка расчетных схем, программного обеспечения, создание рукописи статьи при поддержке С.М. Бурдакова;

Бакланов М.М. – планирование и проведение расчетов, выполнение анализа результатов, разработка расчетных схем, программного обеспечения, статистический анализ модели вычислений;

Бурдаков С.М. – разработка теории, планирование расчетов, выполнение анализа результатов расчетов;

Заяров Ю.В. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Снежана Сергеевна Синятникова, студент 5 курса, кафедра строительных производств, факультет атомной энергетики и машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: sneiany25@inbox.ru

Михаил Максимович Бакланов, студент 5 курса кафедры строительных производств, факультет атомной энергетики и машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: zzzversk@gmail.com

Сергей Михайлович Бурдаков, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Юрий Владимирович Заяров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Sinyatnikova S.S. – theory development, planning and carrying out calculations, performance of results analysis, development of calculation schemes, software, creation of article manuscript with support S.M. Burdakov;

M.M. Baklanov – planning and carrying out calculations, analysis of results, development of calculation schemes, software, statistical analysis of the calculation model;

Burdakov S.M. – development of theory, planning of calculations, analysis of calculation results;

Zayarov Yu.V. – analysis of calculation results, management of research work and verification of its results.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Snezhana S. Sinyatnikova, 5th year student, Construction Production Department, Atomic Energy and Engineering Faculty, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: sneiany25@inbox.ru

Mikhail M. Baklanov, 5th year student, Construction Production Department, Atomic Energy and Engineering Faculty, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: zzzversk@gmail.com

Sergey M. Burdakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of construction industries department, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Yuriy V. Zayarov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Head of Construction Production department, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 31.03.2025

После доработки / Revision 10.06.2025

Принята к публикации / Accepted 12.06.2025