

В. Н. Гордеев, А. В. Перельмутер

**СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Издательство "Сталь"

Киев – 2020

УДК 624.014.2:72.051.8]:621.039.584] (477.41-21 Чернобыль АЕС)

Г68

Стальные конструкции защитных сооружений Чернобыльской атомной электростанции / В. Н. Гордеев, А. В. Перельмутер – Киев: Изд-во "Сталь", 2020. – 80 с.

Книга представляет собою ряд очерков, посвященных предварительному обсуждению, проектированию, изготовлению и монтажу стальных строительных конструкций двух сооружений, последовательно возведенных над разрушенным атомным реактором четвертого блока Чернобыльской атомной электростанции: объекта "Укрытие" и Нового безопасного конфайнмента. В ней на фоне хронологии ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы описывается технический опыт Украинского института стальных конструкций имени В. Н. Шимановского и Научно-производственной фирмы "СКАД-СОФТ", полученный благодаря участию этих организаций в расчетах и проектировании стальных конструкций объекта "Укрытие", в разработке концепции превращения этого объекта в экологически безопасную систему, в научно-техническом сопровождении проектирования Нового безопасного конфайнмента и в совместных работах с французской компанией "НОВАРКА".

Книга предназначена для широкой инженерной общественности.

УДК 624.014.2:72.051.8]:621.039.584] (477.41-21 Чернобыль АЕС)

ISBN 978-617-676-161-7

© В. Н. Гордеев, А. В. Перельмутер

Оглавление

Введение.....	4
1. Саркофаг.....	5
1.1. Авария	5
1.2. Первые мероприятия.....	6
1.3. Проектирование Саркофага.....	8
1.4. Защитные стены	10
1.5. Покрытие.....	12
2. Поддержание работоспособности Саркофага.....	19
2.1. Анализ состояния конструкций	19
2.2. Международный конкурс "Киев-92"	21
2.3. План осуществления мероприятий (ПОМ).....	23
2.4. Работы по стабилизации	26
3. Новый безопасный конфайнмент.....	30
3.1. Концептуальный проект НБК	30
3.2. Рабочее проектирование	34
3.3. Изготовление конструкций	57
3.4. Монтаж.....	62
Заключение.....	70
Список литературы.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Чернобыльская катастрофа не имеет равных по своим последствиям. Она оказала огромное психологическое влияние на население всего мира, стала предметом политических и пропагандистских спекуляций, но, по-видимому, в недостаточной мере осмыслена профессионалами в области проектирования и обеспечения надежности, особенно в части такого размытого понятия, как "культура безопасности". В частности, это касается специфических проблем, связанных с проектированием, изготовлением, монтажом и прогнозированием поведения строительных металлоконструкций для специфических условий их аварийного обрушения, восстановления и ремонта.

Большая обзорная монография [25], посвященная строительным аспектам защитных и реабилитационных мероприятий Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), обращает основное внимание на организационно-управленческие проблемы, но не затрагивает многих вопросов, связанных с проектированием и строительством Нового безопасного конфайнмента (НБК) над 4-м блоком ЧАЭС.

В приведенных ниже заметках отражены работы по конструкциям защитных сооружений, длившиеся в совокупности около тридцати лет. Кроме того, в них уделено определенное внимание и тем научным вопросам, решение которых было инициировано проблемами, возникшими в связи созданием защитных сооружений.

Решение написать эти заметки возникло после того, как после выхода на экраны прекрасного американского фильма "Чернобыль" авторам, имевшим некоторое отношение к реализации защитных мероприятий, стали задавать вопросы о том, что правда в этом фильме, а что является художественным вымыслом. При написании этих заметок был использован не только личный опыт авторов, но и ряд публикаций, среди которых, наряду с монографией [25], следует отметить работы [9, 17, 21, 28, 36].

Хотелось бы надеяться на то, что эта небольшая книга окажется интересной не только узким профессионалам.

1. САРКОФАГ

1.1. Авария

26 апреля 1986 года в 1 час 23 минуты на Чернобыльской атомной электростанции произошла авария, вызванная взрывом атомного реактора четвертого энергоблока станции.

Источником аварии послужил уран-графитовый атомный реактор РБМК-1000 (реактор большой мощности, канальный, 1000 мегаватт). Он был разработан [1, 24] под руководством научного руководителя – академика А. П. Александрова (Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова (ИАЭ)), главного конструктора – академика Н. А. Доллежала (Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ)), и главного конструктора по металлическим конструкциям – академика Н. П. Мельникова (Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций (ЦНИИПСК)). Создатели реактора были настолько уверены в высокой степени безопасности реакторов типа РБМК, что реакторное отделение даже не было оборудовано защитной оболочкой. Они полагали, что в таком агрегате ядерная цепная реакция невозможна в принципе.

Однако жизнь опровергла эту уверенность. Именно с этим видом реактора 26 апреля 1986 г. произошла крупнейшая в истории атомной энергетики авария. В результате этой аварии была полностью разрушена активная зона реактора, повреждены реакторное отделение (1), деаэрационная этажерка (2), машинный зал (3) и ряд других помещений (рис. 1).

Неуправляемая цепная реакция началась в небольшой части активной зоны, вызвала местный перегрев и катастрофическое повышение давления в системе водяного охлаждения. Взорвались трубы топливных каналов, и облако пара подбросило 2500-тонную крышку реактора. В образовавшееся жерло ринулась смесь пара, обломков графитовой кладки, ядерного топлива.



Рис. 1. Разрушения, вызванные аварией:

1 – реакторное отделение, 2 – деаэрационная этажерка, 3 – машинный зал

Крышка реактора упала обратно в активную зону, вызвав дополнительный выброс радиоактивных веществ в атмосферу. Из шахты реактора в центральный зал вырвались сотни кубометров водорода. Смешавшись с воздухом, водород образовал гремучую смесь, которая взорвалась. Именно этот взрыв разрушил крышу, центральный зал реакторного отделения и другие помещения 4-го энергоблока.

1.2. Первые мероприятия

Наступление на разрушенный блок началось сразу же после аварии. Велась дезактивация прилегающей территории, разбросанные взрывом радиоактивные обломки и грунт из наиболее загрязненных мест собирались в контейнеры. Использовалась различная строительно-дорожная техника, в том числе, изготовленная в Польше, Финляндии, ФРГ, Японии. Место водителя защищалось свинцом, а воздух поступал через фильтры. Некоторые машины были оборудованы аппаратурой теленаблюдения. Контейнеры позднее помещали в разрушенный блок или вывозили в места захоронения – "могильники". После предварительной очистки территорию вокруг блока покрыли слоем щебня, песка и бетона толщиной до 1,5 м.

Для предотвращения возможного прожигания перекрытий расплавленным топливом и его проникновения в грунтовые воды в ночь

со 2-го на 3-е мая по инициативе академика Е. Н. Велихова комиссией было принято предложение о создании под нижней железобетонной плитой реактора ледогрунтового основания. Работа была начата, но не завершена: выяснилось, что возможно создание только разобщенных участков замороженного грунта. В связи с этим, а также благодаря начавшемуся снижению температуры реактора, было решено отменить создание ледогрунтового массива и приступить к сооружению под фундаментом реактора "подушки" – охлаждаемой водой железобетонной плиты размерами 30,4×32,4×2,4 м. Внутри плиты должны были находиться трубы с водой для охлаждения. Кроме этого, в теле плиты были установлены датчики для обеспечения контроля температурного режима системы охлаждения подфундаментной плиты.

Сроки разработки проекта организации строительства, детальных проектов производства работ и подготовки производства были установлены в пределах 7–10 дней, в течение которых шахтеры должны были закончить проходку подходной штольни. Срок сооружения плиты был ограничен 25 днями.

12 мая в дело вступили шахтеры. Проходка штольни была поручена шахтопроходчикам из Донбасса и Тулы – предприятиям "Донецкшахтопроходка" и "Мосбассшахтострой". В котловане был смонтирован проходческий щит, доставленный из Киева, и началась проходка штрека. За исключением установки железобетонных тубингов с помощью щита, все работы велись вручную, круглосуточно в восемь трехчасовых смен. Штрек под аварийный реактор длиной около 170 м был пройден и закреплен за 13 суток. Работы по созданию подушки были завершены к 28 июня.

Сегодня ясно, что эти усилия оказались напрасными поскольку тепловые расчеты, проведенные в авральном порядке в 1986 году, не учитывали до конца всех химических процессов, происходящих с расплавленным топливом. В результате топливо не прожгло фундаментную плиту реактора и не попало в грунт. Но пути образования и растекания "чернобыльских" лав стали более или менее понятны только через два-три года, а многие вопросы вызывают споры и по сей день.

1.3. Проектирование Саркофага

После того как в середине мая 1986 года Государственной комиссией было принято решение относительно долговременной консервации четвертого энергоблока ЧАЭС (утверждено Постановлением ЦК КПСС и КМ СССР 634-188 от 29.05.1986 г.) было начато проектирование защитного устройства, официально названного объектом "Укрытие", а неофициально – Саркофагом.

Никто еще не решал задачи такой сложности и масштабов, к тому же, без достоверной информации о состоянии топлива внутри блока и степени разрушения строительных конструкций проектирование и строительство пришлось вести одновременно с получением такой информации.

Функции генерального проектировщика работ "по захоронению 4-го блока ЧАЭС, по захоронению радиоактивных отходов и дезактивации оборудования промплощадки ЧАЭС" были возложены на Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ). Научное руководство работами по захоронению 4-го блока ЧАЭС осуществлял Институт атомной энергии (ИАЭ) им. И. В. Курчатова.

Фактически же проектирование "Укрытия" началось еще 20 мая. Пока проводились неотложные мероприятия на станции, из института ВНИПИЭТ (Санкт-Петербург) в Москву был вызван главный инженер института, профессор Курносоев В. А. Он и возглавил бригаду проектировщиков. Кроме ВНИПИЭТ, проектные работы по различным направлениям выполнялись рядом проектных институтов, в частности, Ленпроектстальконструкцией (Санкт-Петербург), ЦНИИпроектстальконструкцией (Москва), УкрНИИпроектстальконструкцией (Киев), Днепрпроектстальконструкцией (Днепропетровск) и другими институтами.

Учитывая чрезвычайно большую ответственность сооружения, проектировщики рассмотрели восемнадцать вариантов проекта. В их числе перекрытия арочного и купольного типа, консольная подвижная кровля, сооружение холма из щебня и бетона, заполнение шахты реактора металлическими полыми шарами и другие. В результате за основу был взят проект ВНИПИЭТ. Он предусматривал возведение внешних и разделительных стен с максимальным использованием сохранившихся элементов энергоблока в качестве опор и обеспечи-

вал меньше по сравнению с другими проектами материалоемкость и трудоемкость, а главное, приемлемые сроки реализации.

Проект объекта "Укрытие" был реализован с 20 мая по 20 августа 1986 года, но в ходе строительства неоднократно дорабатывался. Схема окончательного варианта Саркофага показана в аксонометрии на рис. 2, в разрезе – на рис. 3.

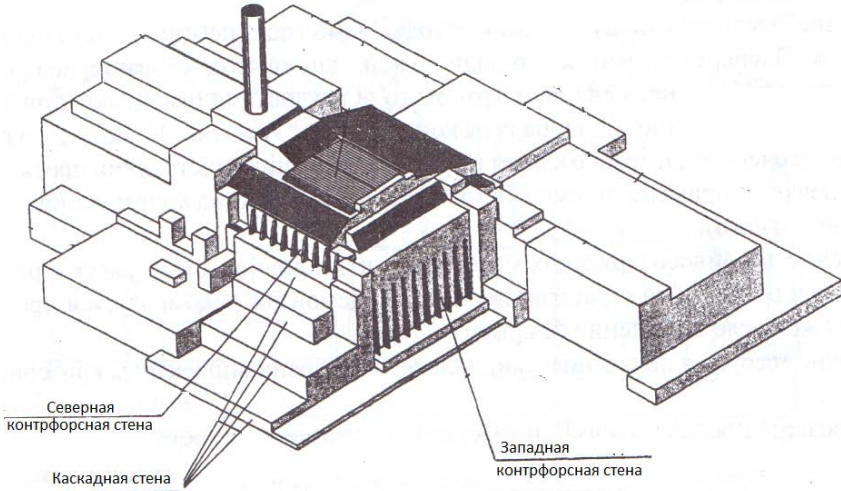


Рис. 2. Схема Саркофага – аксонометрия

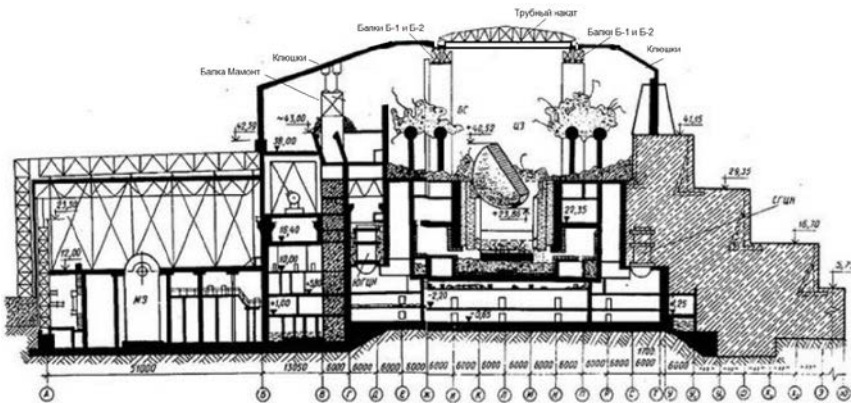


Рис. 3. Схема Саркофага – разрез

1.4. Защитные стены

По периметру разрушенного блока были возведены "пионерные" защитные стены из железобетона, имеющие высоту от 6 до 8 метров. Это позволило несколько обезопасить последующую работу строителей. В августе было проведено рассечение коммуникаций, общих для 3-го и 4-го блоков. Затем были созданы перегородки, отделившие 4-й энергоблок от 3-го: внизу – монолитный бетон толщиной 1,4–2,3 м, выше – полнотелые блоки; в некоторых местах производилось освинцовывание.

Южное ограждение машинного зала и деаэрационной этажерки было произведено поэтажной заливкой бетоном помещений, расположенных между ними в осях В и Г (см. рис. 3).

Закрытие крупного разлома северной стены реакторного отделения выполнялось каскадом в виде выступов, последовательно приближающихся к разрушенному блоку (каскадная стена). Задача этой стены – отсечь завал от остальной территории разрушенного блока. Первый ярус выполнялся из забетонированной опалубки, размещенной на железнодорожных платформах, колесных парах. Первый ярус – высотой 5 метров, остальные четыре – по 12 метров до отметки 53 м.



Рис. 4. "Опалубка" на колесах

С 1 июня у 1-го энергоблока началась сборка металлической опалубки на железнодорожных платформах, которая постепенно обрела форму вагонов, обтянутых сеткой (рис. 4). По верху каркасов

приварили бетоноводные трубы. Потом через них вагон заполнялся бетоном. Железнодорожный путь был расположен в тридцати метрах от стены машинного зала, по нему от 1-го блока к 4-му танками заталкивался этот своеобразный поезд [9].

Несъемная опалубка верхних уступов выполнялась в форме укрупненных металлических конструкций, которые собирались в "чистой" зоне и допускали дистанционный монтаж. Конструкции проектировались с узлами упоров и соединений, которые по замыслу не нуждались в выполнении операций, связанных с присутствием людей непосредственно в зоне монтажа. Они собирались в стороне, и когда очередная такая конструкция была готова, подъемный кран "Деаг" очень высокой (96 метров) и длинной (92 метра) стрелой поднимал эту конструкцию и переносил в предназначенное место.

Заливка бетоном выполнялась дистанционно. Для подачи бетона использовались автобетононасосы "Путцмайстер" и "Швинг", которые имели стрелы для подачи бетона длиной около 50 м и были оборудованы телекамерами и выносными пультами управления. Внутри выступов захоранивались поврежденные конструкции и контейнеры с высокоактивными отходами (рис. 5).

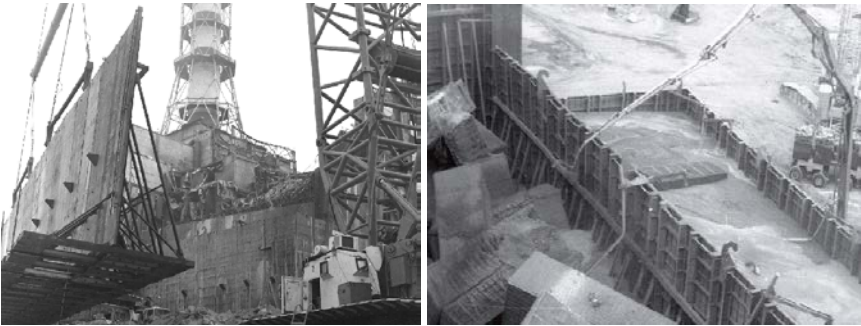


Рис. 5. Монтаж опалубки каскадной стены и заливка бетоном

Частично сохранившаяся западная часть была закрыта стеной с контрфорсами высотой до 50 метров. Металлический каркас контрфорсной стены запроектирован в ЦНИИПСК [32]. Каркас разбит на секции $6 \times 20 \times 45$ м с основанием 6×20 м и массой 76 тонн (рис. 6).

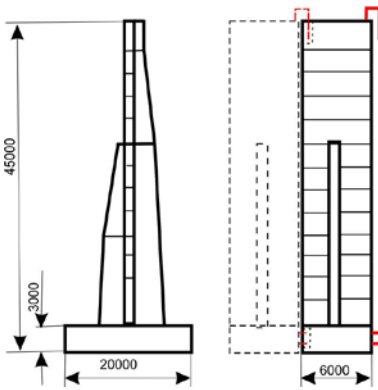


Рис. 6. Секции контрфорсной стены

Секция состоит из стальных листов толщиной 2 мм, которые соединены между собой системой решетчатых ферм. Одной из проблем была неопределенность условий установки на грунт: рельеф был неизвестен. Поэтому использовалась специальная технология монтажа, при которой секция удерживалась краном на весу (примерно сутки), пока бетон, заливаемый в основание секции, не набирал примерно 30%-ную прочность.

Для обеспечения правильного положения каждой устанавливаемой секции были предусмотрены специальные замковые устройства. Они позволяли компенсировать неровности и уклоны основания.

Все конструкции были выполнены из низколегированной стали повышенной коррозионной стойкости марки 10ХНДП. Предполагалось, что после заливки бетоном конструкция будет работать как сталебетонная с внешней листовой обшивкой, однако реально ее забетонировали только до высоты 6 метров, что впоследствии стало одной из причин ее усиления.

1.5. Покрытие

Для создания покрытия над центральным залом реактора и деаэрационной этажеркой необходимо было найти опоры для установки новых несущих конструкций. При этом расстояния между опорами не должны были превышать предельных размеров, обеспечивающих монтаж покрытия подъемным краном "Демаг". После исследований сохранившихся конструкций были приняты следующие решения по устройству покрытия над центральным залом реактора и деаэрационной этажеркой.

В качестве опоры главных балок Б1 и Б2 были выбраны на западе остатки железобетонной стены по оси 50 толщиной около 0,9 м и железобетонные выхлопные шахты, сохранившиеся после взрыва. Стена по оси 50 имела ряд серьезных трещин и других местных разрушений, а также отклонение в сторону оси 51. Определение ее со-

стояния непосредственным обследованием не представлялось возможным.

Основу центральной части покрытия составляют балки Б2 (рис. 7). Они представляют собой спаренные металлические конструкции из стали 09Г2С пролетом 38,0 м, высотой 3,4 м, массой 130 т. По балкам Б2 уложен так называемый трубный настил. Он состоит из 27 труб длиной 34,5 м, диаметром 1220 мм с толщиной стенки 15,2 мм. По всей длине трубы к ней с двух сторон приварены гнутые швеллеры 800×150×10 мм.

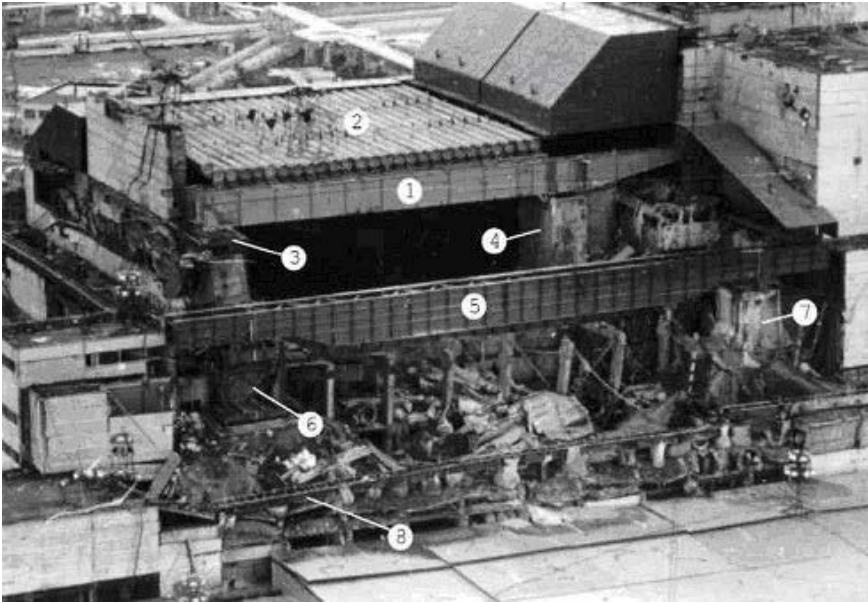


Рис. 7. Конструкции несущих элементов покрытия:

1 – балка Б1 (балка Б2 находится за ней); 2 – трубный накат; 3 – верхняя часть стены по оси 50, усиленная "корсетом"; 4 – выхлопная шахта; 5 – балка "Мамонт"; 6 – западная опора балки "Мамонт"; 7 – восточная опора балки "Мамонт"; 8 – балка "Осьминог"

Несущая способность трубных элементов обеспечивается со значительным запасом, поскольку они проектировались для восприятия нагрузки слоя бетона толщиной 600 мм. От применения бетона в процессе строительства отказались, уложив поверх труб по прогонам легкую кровлю из профнастила.

Северная и южная части покрытия имеют наклонные и вертикальные плоскости и состоят из отдельных щитов. Несущую основу этих щитов покрытия составляют Г-образные элементы, так называемые "клюшки".

Северные клюшки имеют пролет наклонного участка 13 м и высоту вертикального участка 3,5 м. Они обшиты листом толщиной 4 мм. Ширина щитов составляет 3 м. Опираются они на балки Б1 и северную контрфорсную стену.

Южные клюшки, расположенные между рядами Б и В, состоят из продольных и поперечных балок и настила толщиной 3 мм. Они имеют вертикальную стенку высотой 12,25 м и наклонный участок длиной 12,9 м. Ширина щитов – 6 м. Эти щиты опираются на южную ветвь балки "Мамонт" и на балку "Осьминог".

Южные щиты с обшивкой из листа толщиной 4 мм расположены между рядами Ж и В в осях 45–50. По оси Ж они опираются на балку Б1, а по оси В – на балку "Мамонт". Аналогичную конструкцию имеют восточные и западные металлические щиты.

Покрытие машзала между осями 41–49 было очень повреждено. Поэтому было принято решение поверх существующего разместить новое покрытие по фермам, опирающимся на новые пространственные решетчатые колонны.

Технология монтажа основывалась на следующих принципах:

- максимально возможное укрупнение монтажных блоков;
- дистанционная расстроповка;
- дистанционное (по телевидению) наблюдение за процессом;
- использование мобильных кранов максимальной грузоподъемности.

Монтаж металлоконструкций велся дистанционным способом под контролем промышленного телевидения, камеры которого располагались на стрелах кранов и на специальных вышках, установленных в пунктах максимального обзора. Много забот вызывали вопросы дистанционной расстроповки монтируемых конструкций. Пробовали отстреливать стропы кумулятивными зарядами, но у них случался отказ. Позже была создана специальная траверса и оригинальный крюк (рис. 8), который обеспечивал дистанционную расстроповку конструкции после ее установки на место.

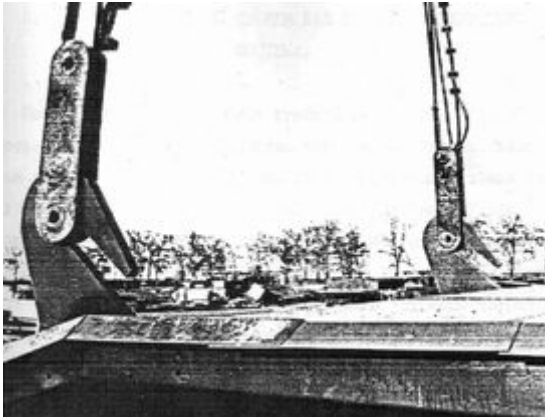


Рис. 8. Узел строповки конструкций

Первыми монтируемыми элементами покрытия были балки Б2. Две спаренные балки и соединяющие их связи были собраны в единый объемный блок, который окрестили "самолетом". Под опорные узлы балок подклеили резину для более плотного примыкания к железобетонным опорам. Самое сложное заключалось в том, чтобы зафиксировать сразу четыре опоры этого блока. Когда "самолет" сел на опоры, нагрузку с крана сразу не сняли, поскольку были сомнения в несущей способности опор. Лишь после тщательного дистанционного осмотра опорных узлов кран отпустили.

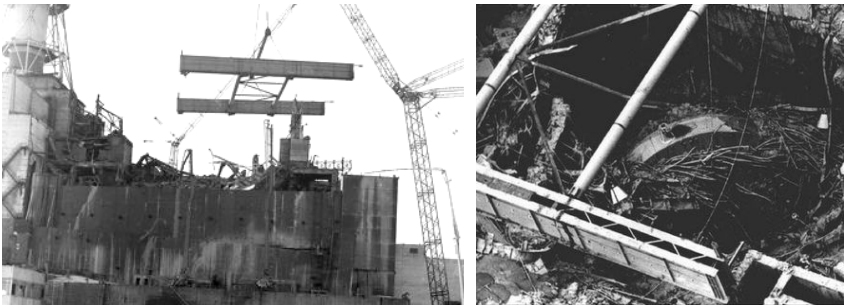


Рис. 9. Монтаж балок Б2 ("самолета") – наводка и расположение на месте

На балки Б1 уложили 27 металлических труб диаметром 1220 мм, длиной 34,5 м, а над трубами разместили кровлю из профилированного настила – 6 пространственных блоков.

Опорой для южных стальных щитов служит с одной стороны балка Б2, а с другой стороны – стальная балка длиной 70 м и весом 160 т, которую из-за гигантских размеров окрестили "Мамонт" (рис. 7), опирающаяся, в свою очередь, на бетонные опоры у осей 41 и 51. Опоры были выполнены на завале из разрушенных железобетонных конструкций перекрытий двух верхних этажей, обломков оборудования и трубопроводов. Для обеспечения большей надежности основания опор было произведено заполнение завала бетоном.

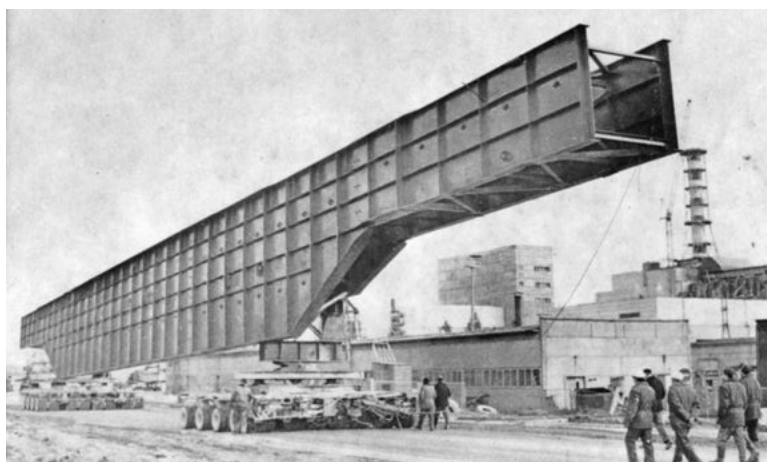
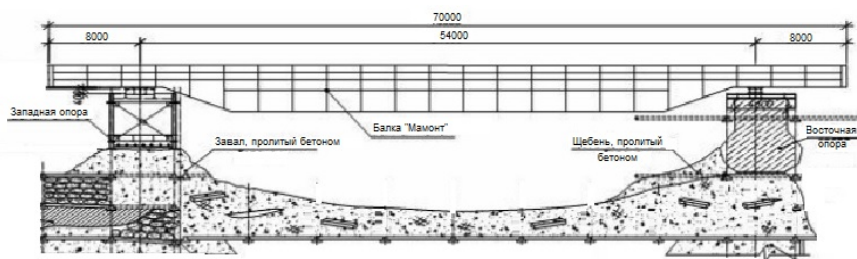


Рис. 10. Балка "Мамонт" (схема опирания и вид при транспортировке)

Чтобы обеспечить горизонтальную поверхность опирания, был использован металлический ящик с высокими бортами и днищем из гибкой металлической сетки, способной приобретать форму основания под действием заливаемого бетона. Жидкий бетон, растекаясь по ящику, создавал горизонтальную поверхность. В связи с отсутствием возможности качественного производства работ и осуществления контроля (недоступность, высокие радиационные поля) по

настоянию проектировщиков ВНИПИЭТ были проведены испытания опор пробным грузом, превышающим расчетную нагрузку в полтора раза.



Рис. 11. Погрузка укрупненного блока клюшек

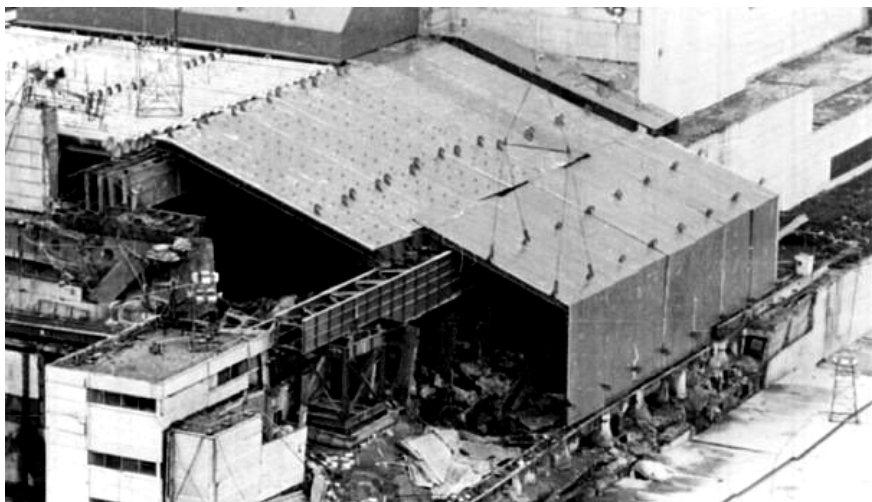


Рис. 12. Южные щиты, опирающиеся на балку "Мамонт", и южные клюшки, опирающиеся на балку "Осьминог"

Блоки покрытия, выполненные из металлических щитов, из-за своей формы получили собственные названия: "Клюшка", "Собачий дом", "Мини-юбка" и другие. Каждая "клюшка" весила 25 тонн. Из них собирались укрупненные блоки (рис. 11, рис. 12). В пространстве между перекрытием реакторного зала и балкой "Мамонт" было смонтировано 10 таких блоков. Работы шли больше месяца. Они контролировались с помощью телевидения.

Балка "Осьминог" должна была лечь на стену деаэрационной этажерки со стороны машинного зала. Состояние оставшихся конструкций было такое, что сооружать опоры не представлялось возможным. Поэтому балку спроектировали в виде короба длиной 100 м и обтянули металлической сеткой. Вес конструкции превысил 180 тонн. Основание было неровным, перепады разломанных конструкций достигали одного метра по высоте. Чтобы закрепить балку горизонтально, через каждые три метра подвесили мешки из капроновых рыболовецких сетей, которые, заполняясь бетоном, принимали форму основания. Затем была забетонирована и сама балка до верхнего обреза.

На строительство Укрытия ушло 400 тысяч кубометров бетонной смеси и 7 тысяч тонн металла. В постройке сооружения было задействовано 90 тысяч человек.

2. ПОДДЕРЖАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ САРКОФАГА

2.1. Анализ состояния конструкций

Из-за высочайших темпов строительства и поспешного выполнения некоторых работ "герметичность" "Укрытия" оставляет желать лучшего: общая площадь щелей в кровле и стенах составляет около 1000 м². Дистанционные методы монтажа конструкций и невозможность применять сварку для их соединения не позволили оценить объект как безусловно устойчивое сооружение.

В период с конца 1986 по 1988 год основные усилия были направлены на решение проблем ядерной и радиационной безопасности, создание и эксплуатацию информационно-диагностического комплекса, получение информации по распределению топливных масс и оценку уровней загрязнения, как внутри саркофага, так и за его пределами.

Саркофаг строился в экстремальных условиях. Новые конструкции Саркофага были оперты на старые полуразрушенные конструкции, обследование которых оказалось невозможным из-за больших радиационных полей. Поэтому прочность опор и всего сооружения осталась сомнительной.

Все это привело к пониманию того, что работы по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы с построением Саркофага далеко не закончены. Кроме того, имелась необходимость детального анализа состояния конструкций, построенных столь нестандартным способом, и выработки суждения об их надежности и долговечности. Детальное освидетельствование и аналитические расчеты выполнялись специалистами Научно-исследовательского института строительных конструкций Госстроя Украины (НИИСК) [25, 26, 27, 33, 34] и Научно-исследовательского института механики быстропротекающих процессов при Национальном авиационном университете [11, 43].

Вследствие весьма низкой точности монтажа сооружение имеет щели, площадь которых измеряется квадратными метрами. Кровля его протекает. Вода, попадающая через неплотности ограждения, служит источником нескольких видов опасности: она может привести к увеличению критичности топливосодержащих масс (ТСМ), а со временем, по мере их охлаждения и разрушения, – к образованию ядерно-опасных композиций. Кроме того, она может загрязнять радионуклидами грунтовые воды.

В августе 1989 г. Совет Министров СССР поручил Госстрою СССР провести детальное обследование состояния строительных конструкций объекта "Укрытие". Выполнение этого поручения было возложено на киевский институт НИИСК. К этому же времени стало очевидным, что объект "Укрытие" не может гарантировать ядерную и радиационную безопасность при экстремальных природных воздействиях (землетрясение, ураган). И в середине 1989 г. Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова была предложена новая концепция долговременного и экологически безопасного захоронения топлива. В ней была идея построить над Саркофагом новое герметичное "Укрытие-2", позволяющее полностью изолировать внешнюю среду от ТСМ внутри объекта. Одновременно "Укрытие-2" могло стать надежной оболочкой, под которой можно было бы провести разборку объекта.

Предварительная проработка различных вариантов преобразования объекта была проведена институтом ВНИПИЭТ в 1991 г.

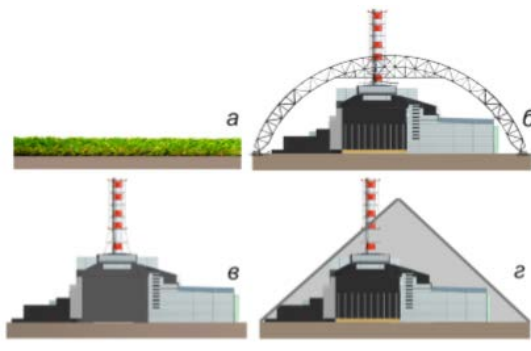


Рис. 13. Варианты ВНИПИЭТ: а – "Зеленая лужайка", б – "Арка", в – "Промежуточное омоноличивание", з – "Холм"

Были предложены и проанализированы такие варианты (рис. 13):

- "Зеленая лужайка" (полная разборка Укрытия);
- "Арка" (создание "Укрытия-2" над существующим объектом для длительного хранения топлива до окончательной разборки);
- "Промежуточное омоноличивание" (последовательная заливка бетоном помещений объекта, а в будущем – его разборка);
- "Холм" (полная засыпка объекта).

Большая работа по обследованию состояния конструкций Саркофага, выработке проектных критериев для их оценки и усиления была выполнена Межотраслевым научно-техническим центром "Укрытие" (МНТЦ) Национальной академии наук Украины, созданным в 1992 году. Ему были поручены проектно-конструкторские работы по преобразованию Саркофага в экологически безопасную систему.

2.2. Международный конкурс "Киев-92"

Для широкого обсуждения проблемы преобразования Саркофага в надежное укрытие украинское правительство решило провести Международный конкурс по преобразованию Саркофага в экологически безопасную систему, известный под названием "Киев -92". Организаторами конкурса выступили Минчернобыль Украины и Национальная академия наук Украины. Условия конкурса предполагали, что участники могут присылать как проекты преобразования, так и отдельные идеи и технологии. К моменту окончания приема предложений их общее количество составило около 400.

Конкурсную комиссию, состоящую из наиболее видных ученых и руководителей высокого ранга, возглавлял президент Национальной академии наук Украины Б. Е. Патон.

Вначале представленные на конкурс работы были рассмотрены рабочей группой (председатель В. И. Купный) по формальным оценочным критериям и переданы конкурсной комиссии. По совокупности этих критериев 19 предложений были признаны конкурсной комиссией лучшими. На совместном заседании конкурсной комиссии и оргкомитета по итогам предварительной экспертизы авторы этих предложений были допущены к участию во втором туре конкурса и к публичной защите. Вот эти 19 предложений:

- "RESOLUTION" (Франция – Украина);
- "336" (Германия, Hochtief AG);

- "РАДУГА" (Украина – Франция);
- "GREENLEAF" (Великобритания – Украина);
- "МОНОЛИТ" (Россия, ВНИПИЭТ и др.);
- "ПЛУТОН" (Украина – Россия);
- "PROTECTOR" (Великобритания);
- "БЕЗОПАСНЫЙ САРКОФАГ" (Россия, "НИКИМТ");
- "ГЕЯ" (ПО "Спецатом");
- "337" (Италия, ISMES);
- "TENT" (Украина, НИИСК, УкрНИИпроектстальконструкция, Укрспецмонтажпроект);
- "AVAL" (Украина, Запорожская АЭС);
- "LAST CHANCE" (Россия, Чаадаев В. К.);
- "ЗА ГАРМОНИЮ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДЫ" (Беларусь, Институт радиэкологических проблем и Институт проблем энергетики АНБ);
- "264" (Россия – Украина, НИКИМТ, Обнинское отделение, Объект "Укрытие");
- "5865" (Украина, Минчернобыль, Пинчук В. Я.);
- "УКРОЩЕНИЕ СТРОПТИВОГО" (Украина, НТЦ "КОРО");
- "Вихрь" (ЧНПФ "БОРТНИК");
- "196" (Институт геологических наук АН Украины).

В июне 1993 года конкурс был завершен. Первую премию было решено не присуждать, поскольку ни один из проектов в полной мере не отвечал условиям конкурса. По результатам тайного голосования лучшим проектом, удостоенным второй премии (10 тыс. долларов США), был признан проект "RESOLUTION". Этот проект представлен объединенной командой "ALLIANCE" под руководством фирмы "CAMPENON BERNARD SGE". Эта команда из 16 участников представила материал, наиболее полно отвечающий целям преобразования объекта "Укрытие".

Пять проектов были отмечены поощрительными премиями (по 5 тыс. долларов США). Их разместили в следующем порядке:

- "336" (Германия, Nochtief AG);
- "РАДУГА" (Украина – Франция);
- "GREENLEAF" (Великобритания – Украина);
- "МОНОЛИТ" (Россия, ВНИПИЭТ и др.);

- "ПЛУТОН" (Украина – Россия). Вишачая строка

Международный конкурс познакомил зарубежные строительные фирмы с проблемой ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы и дал украинской стороне целый набор вариантов решения этой проблемы.

Основным был признан вариант создания Нового безопасного конфайнмента, который герметично закрывает разрушенный энергетический блок № 4 и включает в себя комплекс технологического оборудования для демонтажа радиоактивно зараженных конструкций и оборудования, извлечения топливосодержащих материалов, а также оснащен другими системами, предназначенными для превращения разрушенного энергетического блока в экологически безопасную систему. Признано также, что рациональной конструктивной формой Нового безопасного конфайнмента является большепролетная арочная система.

Стало понятным, что ликвидацию последствий Чернобыльской катастрофы невозможно выполнить без экономической помощи стран-доноров, выделяющих средства для этой цели.

2.3. План осуществления мероприятий (ПОМ)

В апреле 1994 года Европейской комиссией был объявлен тендер на разработку технико-экономического обоснования (ТЭО) стабилизации существующего объекта "Укрытие" и сооружения "Укрытия-2" в рамках программы "Tacis". Тендер выиграл призер Международного конкурса – консорциум "Alliance" во главе с французской компанией "CAMPENON BERNARD SGE". В группу "Alliance" входили, кроме этой компании, следующие организации и фирмы: "AEA TECHNOLOGY" (Великобритания); "BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS" и "SGN" (Франция); "TAYWOOD ENGINEERING" и "WALTER BAU" (Германия).

На базе этих организаций с привлечением украинских и российских специалистов сформировалась международная группа экспертов, которая занималась подготовкой технико-экономического обоснования. В июле 1995 года консорциум "Alliance" завершил работы над ТЭО и представил отчет, который наметил основные этапы работ по преобразованию объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему.

Было предложено, чтобы "Укрытие-2" имело вид большепролетной арочной конструкции, которая сооружается на монтажной площадке к западу от Саркофага и по мере готовности передвигается в восточном направлении. Затраты на реализацию проекта были оценены примерно в 1,5 млрд. долларов США.

Группа международных экспертов продолжила свою работу над этой проблемой и в мае 1997 года представила общественности очень важный документ: "План осуществления мероприятий на объекте "Укрытие" (ПОМ) или, на английском языке, "Shelter Implementation Plan" (SIP). Он в дальнейшем стал основой для оказания финансовой помощи Украине по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы.

Этот план определил ряд шагов, направленных на приведение объекта "Укрытие" в экологически безопасное состояние и сформулировал соответствующие задачи (таблица 1).

Таблица 1

Цель 1. Снижение вероятности обрушения, структурная стабилизация	
Задача 1	Сводный проект по стабилизации, защите и мобилизации
Задача 2	Стабилизация западного участка объекта "Укрытие"
Задача 3	Стабилизация и экранирование балки "Мамонт" и южного участка
Задача 4	Стабилизация и экранирование восточного и северного участков
Задача 6	Структурные исследования и мониторинг
Задача 8	Сейсмические характеристики и мониторинг
Цель 2. Смягчение последствий аварии (обрушения)	
Задача 9	Аварийная готовность
Задача 10	Обращение с пылью
Задача 11	Аварийная система пылеподавления
Задача 5	Стабилизация кровли, опор кровли и покрытия
Задача 7	Геотехнические исследования

Цель 3. Повышение ядерной безопасности	
Задача 12	Критичность и ядерная безопасность
Задача 13	Обращение с водой
Задача 14	Характеризация топливосодержащих материалов (ТСМ)
Цель 4. Повышение безопасности персонала и окружающей среды	
Задача 15	Программа радиологической защиты
Задача 16	Промышленная безопасность, противопожарная защита, контроль доступа
Задача 17	Интегрированная система мониторинга
Задача 18	Интегрированная база данных
Цель 5. Стратегия и технико-экономическое обоснование (ТЭО) по преобразованию объекта в экологически безопасную систему	
Задача 19	Изучение и стратегия извлечения ТСМ и обращение с радиоактивными отходами
Задача 20	Разработка технологии извлечения ТСМ
Задача 21	Стратегия безопасного конфайнмента
Задача 22	Создание и ввод в эксплуатацию Нового безопасного конфайнмента

В июне 1997 года SIP был одобрен Украиной и странами большой семерки G7. Для его финансирования было решено создать Международный Чернобыльский фонд "Укрытие" (ЧФУ).

20 ноября 1997 года в Нью-Йорке состоялась конференция стран-доноров, согласных выделять средства в Чернобыльский фонд "Укрытие", и подписано "Рамочное соглашение" между Украиной и Европейским банком реконструкции и развития (ЕБРР) о деятельности ЧФУ в Украине. Была создана группа управления проектом (ГУП).

12 декабря 1997 года в Лондоне состоялась первая Ассамблея доноров, на которой было подтверждено, что страны-доноры выделяют 387 млн. долл. в ЧФУ. В этот фонд за время его существования сделали взносы 40 стран мира, предоставив около 7 млрд. долл. на реализацию плана.

В феврале 1998 года был объявлен тендер по выбору фирмы-консультанта ГУП. Победителем этого тендера был признан Консорциум, в который вошли компании "Bechtel" (США), "Battelle" (США) и "EDF" (Франция). В сферу услуг фирмы-консультанта вошли четыре пакета задач:

- Пакет А – Гражданское строительство.
- Пакет В – Эксплуатация и мониторинг.
- Пакет С – Аварийные системы.
- Пакет Д – Топливосодержащие материалы.

Победителем тендера по пакету А оказался Международный консорциум "ICSS MK" (JV) в составе: "Morrison Knudsen International" (США), "BNFL Engineering Ltd" (Великобритания), институт НИИСК (Украина), Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Энергопроект" (КИЭП) (Украина) и Межотраслевой научный и технический центр Национальной академии наук Украины "Укрытие" (МНТЦ) (Украина).

Финансирование работ осуществлялось под контролем Европейского банка реконструкции и развития из специально созданного международного фонда. Для анализа выполняемой работы была создана специальная команда из 12 ядерных экспертов со всего мира под руководством Карло Манчини из Италии. Члены этой группы не подчинялись конкретному правительству или организации, и после одобрения международных представителей их решения нельзя было отменить ни по каким причинам. Кроме того, в Украине, помимо Международной группы экспертов, работала группа независимых экспертов по оценке концептуальных решений, предлагаемых для стабилизации объекта "Укрытие" и возведения Нового безопасного конфайнмента.

2.4. Работы по стабилизации

Первым делом проекта должно было стать укрепление существующего Саркофага, чтобы он не разрушился раньше времени. За все десять лет после катастрофы единственным, что помешало дальнейшему разрушению реактора, была эта структура из бетона и металла, спешно возведенная в тяжелых условиях в течение нескольких месяцев после аварии. Уровень радиации внутри структуры, по оценкам, может достигать 10 000 рентген в час, в 20 раз больше

смертельной дозы. Структура была в плохом состоянии, но простыми ремонтными работами ее было не залатать.

Одним из первых был осуществлен ремонт общей для 3-го и 4-го энергоблоков вытяжной трубы, получившей заметные повреждения при взрыве. Эта башня-труба расположена в непосредственной близости от взорвавшегося атомного реактора и повреждена разлетающимися обломками конструкций и содержимого реактора. Несмотря на выполненную ранее дезактивацию конструкций, уровень радиации на момент обследования остался высоким. На рабочих площадках и на элементах конструкций можно было найти куски радиоактивного графита.

Основание башни-трубы находилось на отметке 74,5 м, а верх – на отметке 150 м. Для того, чтобы добраться до основания башни-трубы, надо было пройти часть пути внутри Саркофага, где был высокий уровень радиации, затем по стремянкам подниматься до нужной отметки. Уже сам путь представлял значительные трудности.

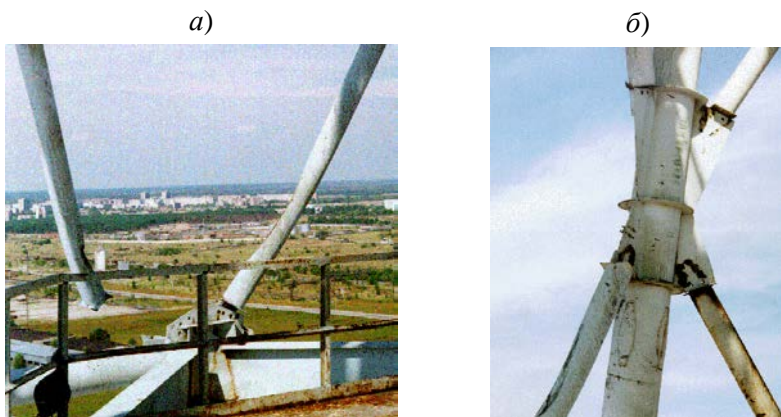


Рис. 14. Некоторые из обнаруженных повреждений: а) отрыв и общее искривление элементов решетки; б) локальные вмятины

Работу по обследованию конструкций башни летом 1996 года выполнила бригада специалистов института "УкрНИИпроектстальконструкция". Обследование показало, что взрыв атомного реактора не повлек за собой заметных вмятин в трубе и серьезных повреждений самой вытяжной трубы. Однако серьезные опасения вызвали повреждения конструкций поддерживающей башни (рис. 14), находящиеся

ся в непосредственной близости от взорвавшегося ядерного реактора, и крепления башни-трубы к основанию. Эти опасения были столь велики, что 15 октября 1997 года Минэнерго Украины и Минэнерго США подписали "Протокол о сотрудничестве в рамках проекта по ремонту венттрубы блоков 3 и 4 ЧАЭС", а затем и заказ-наряд № 7 на ремонт основания и креплений венттрубы. В соответствии с этим заказ-нарядом были выполнены необходимые ремонтные работы (рис. 15).

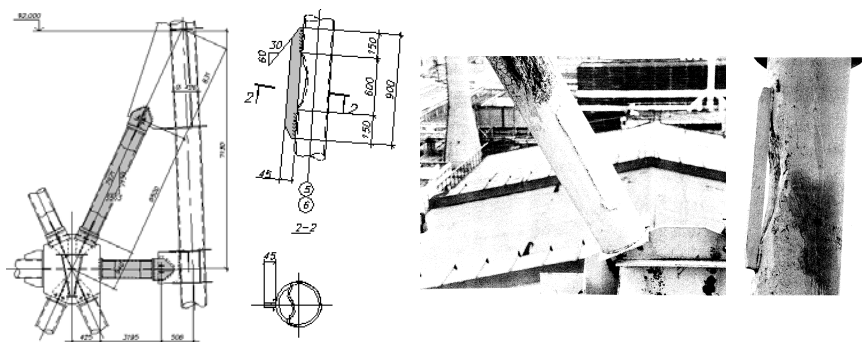


Рис. 15. Ремонт решетки и укрепление вмятин: проект и реализация

Затем был выполнен ряд работ, предложенных НИИСКом, по локальным усилениям конструкций Саркофага.



Рис. 16. Связующая ферма

Из них к металлическим конструкциям относилось укрепление узла опирания балок Б1 и Б2 и установка дополнительных связей между этими балками, замена части трубного наката легкой кровлей, со-

единение щитов южных ключек с плоскими щитами кровли путем установки связующей фермы, приваренной к монтажным крюкам (рис. 16) и др.

Но самым серьезным из стабилизационных мероприятий было усиление западного фрагмента Саркофага, осуществленное в виде двух пространственных стальных башен, установленных на фундаменты и соединенных между собой в пространственный блок (рис. 17). В верхних частях башен были сделаны консоли, предназначенные для опирания балок Б1 и Б2. К опорным узлам этих балок были приварены удлинения, через них с помощью поддомкрачивания на систему усиления было передано 80 % реакции с тем, чтобы на ненадежной стене по оси 50 осталось лишь 29 % от нее.



Рис. 17. Усиление контрфорсной стены

Проведенная стабилизация уменьшила риски обрушения строительных конструкций, и тем самым был достигнут некоторый уровень стабильности объекта "Укрытие", но только на короткий период (примерно до 2023 года). При этом учитывалось, что из-за ограниченного или невозможного доступа во многие помещения нет информации о том, что происходит внутри немалой части Саркофага, то есть, в принципе, отсутствовали надежные количественные оценки разных видов опасности внутри объекта.

3. НОВЫЙ БЕЗОПАСНЫЙ КОНФАЙНМЕНТ

3.1. Концептуальный проект НБК

По заказу Чернобыльской АЭС разработку концептуального проекта Нового безопасного конфайнмента выполнили консорциум компаний "Bechtel" и "Battelle" (США), "EDF" (Франция) и украинский консорциум КСК, представленный Научно-исследовательским институтом строительных конструкций, Киевским институтом "Энергопроект" и Межотраслевым научно-техническим центром "Укрытие".

В процессе работы рассматривались различные варианты конструктивного решения, но, в конце концов, основными конкурирующими вариантами были признаны три следующих: вариант РАМА, вариант ДОК-КЕССОН и вариант АРКА. Эти варианты были достаточно детально проработаны и оценены с различных точек зрения.

Вариант РАМА

Надземная часть этого варианта имеет вид здания прямоугольной формы с габаритами в плане 180×99 м и высотой 89,5 м, оборудованного мостовыми кранами грузоподъемностью 30/5 т.

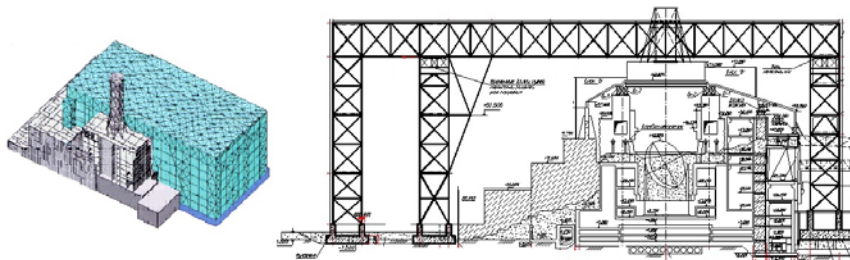


Рис. 18. Вариант РАМА

Основными несущими конструкциями являются две пространственные решетчатые рамы, расположенные вдоль длинной стороны (север-юг) и западная пространственная решетчатая конструкция. Рас-

стояние между пространственными рамами и между пространственной несущей конструкцией западного фрагмента – 36 м (в свету). Ригели пространственных рам состоят из двух плоских решетчатых металлических ферм, объединенных горизонтальными и вертикальными связями. Расстояние между плоскими фермами в осях – 6 м, высота среднего ригеля – 14 м, крайнего – 12 м. Между пространственными ригелями рам и конструкцией западного фрагмента в уровне верхних поясов монтируются кровельные блоки, которые образуют жесткий диск покрытия. Фундаменты конфайнмента – монолитные железобетонные. В северной и западной зонах фундаменты выполняются в виде плиты, в южной зоне предусматривается монолитная железобетонная пространственная опора высотой 45,5 м.

Вариант ДОК-КЕССОН

Аналогом в части конструкции и технологии изготовления этого варианта послужил плавучий док для извлечения ядерных реакторов из подводных лодок. Это определило используемую терминологию.

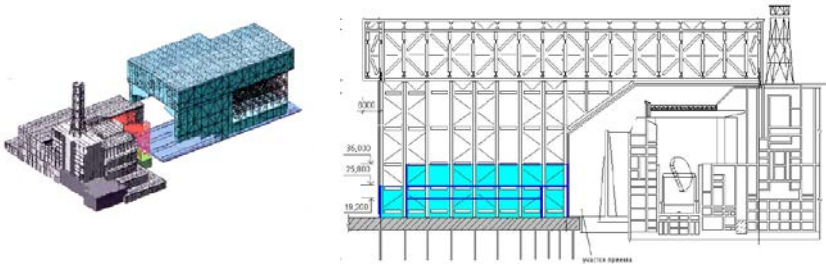


Рис. 19. Вариант ДОК-КЕССОН

Сооружение предложено расположить на запад от существующего Саркофага. Оно решено в виде прямоугольного многопалубного корпуса с расположенными в уровне верхней палубы носовой и кормовой консольями. В корпусе размещено оборудование и обеспечивающие системы. По периметру он огражден наружными носовой и кормовой стенками, левым и правым бортами, снизу – днищем, а сверху – крышей. Для оборудования внутренних помещений и обеспечения необходимой прочности в корпусе устанавливаются продольные и поперечные переборки, а также горизонтальные палубы. Несущие конструкции предполагается выполнить в виде каркаса из

вертикальных и горизонтальных балок, обшитого плоскими листами (при необходимости с подкреплениями), благодаря чему создается прочная непроницаемая оболочка. Корпус двумя вертикальными переборками разделен на три пролета, над которыми над верхней палубой размещены подкрановые пути. Носовая консоль предназначена для накрытия существующего объекта "Укрытие", а кормовая – для введения в ДОК-КЕССОН сменного оборудования.

Габаритные размеры сооружения (276×80 м в плане и 94 м по высоте) определены требованиями сопряжения с конструкциями Саркофага.

Вариант АРКА

Представляемый конфайнмент арочного типа состоит из трех разных элементов: арочного покрытия, торцевых стен и фундаментов. Габариты конфайнмента: пролет арочного покрытия – 245 м (внутренний размер); высота арки – 86,5 м (внутренний размер от верха фундамента до верхней точки арки); длина – 144 м (от оси 40 в западном направлении).

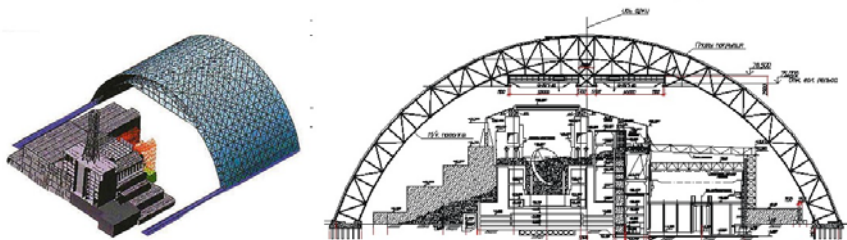


Рис. 20. Вариант АРКА

Арочное покрытие состоит из четырех сегментов, имеющих длину 36 м. Каждый сегмент разработан как пространственная решетчатая конструкция, состоящая из четырех плоских арок, объединенных между собой горизонтальными и вертикальными связями и прогонами по верхним и нижним поясам. Плоские арки – постоянного поперечного сечения по высоте. Пролет арки – 245 м, высота – 86,5 м, расстояние между поясами – 12 м (в осях). Сечения верхних и нижних поясов и решетки трубчатые. По длине сечения поясов переменные: в нижней части (до затяжки) из труб – диаметром 1020×10 мм, в верхней части из труб – диаметром 820×10 мм. Для

уменьшения взаимного смещения отдельных узлов арки и обеспечения нормальной работы мостовых кранов предусматривается затяжка трубчатого сечения на отметке 78 м.

Каждый арочный сегмент собирается в относительно чистой зоне площадки (примерно 120 м от торца машзала в западном направлении) на специальных монтажных лесах. Полностью укомплектованный (с облицовкой и кровельными панелями) арочный сегмент передвигается по путям перекачки на расстояние 36 м. Второй арочный сегмент собирается и стыкуется с первым и передвигается еще на расстояние 36 м, затем третий сегмент стыкуется с предыдущими двумя и также передвигается на 36 м, затем стыкуется четвертый сегмент, отодвигается на 24 м, к нему подвешивается часть западной торцевой стены, и полностью собранная конструкция размером 144 м надвигается в проектное положение на расстояние 183 м.

Сопоставления

Для всех вариантов были рассмотрены вопросы монтажа конструкций, величины трудозатрат и коллективных доз радиации, график продолжительности строительства, вопросы обеспечения безопасности при выполнении работ, вопросы радиационной защиты. При этом учитывался фактор выполнения работ (монтаж конструкций) на месте или в относительно чистой зоне с надвижкой сооружения НБК.

По затратам труда и срокам строительства вариант РАМА оказался предпочтительным по отношению к другим вариантам НБК. Однако показатель коллективной эффективной дозы для этого варианта – наивысший. По сравнению с вариантом АРКА это увеличение составляет 24 %, а по сравнению с вариантом ДОК-КЕССОН – 46 %. Годовые эксплуатационные затраты для варианта РАМА выше на 25 % по отношению к другим вариантам НБК. На стадии концептуального проекта видно, что по сметной стоимости варианты РАМА и АРКА – почти равноценны. Вариант ДОК-КЕССОН по технико-экономическим показателям уступает вариантам АРКА и РАМА.

Учитывая, что основным показателем следует считать величину коллективной эффективной дозы, в качестве приоритетного направления предложен сценарий укрупнительной сборки в относительно чистой зоне с последующей надвижкой в проектное положение. Сопоставление технико-экономических показателей вариантов такого

сценария показывает преимущество варианта НБК АРКА по отношению к НБК ДОК-КЕССОН. Дополнительным критерием выбора предпочтительного варианта НБК являлось независимое ранжирование по качественным требованиям, включая строительные аспекты, функциональные требования, обеспечение безопасности и защиту окружающей среды. Данные критерии оценивались по лингвистической шкале: "лучшее решение"; "приемлемый результат"; "менее благоприятный результат". Наибольшую сумму баллов набрал вариант НБК АРКА, наименьшую – ДОК-КЕССОН. С конструктивной точки зрения, основным преимуществом арочного покрытия является то, что оно полностью накрывает сооружение объекта "Укрытие", в котором находится основное скопление топливосодержащих масс и радиоактивных отходов.

Концептуальный проект был представлен на общественных слушаниях в марте 2004 года в городе Славутич. Международными экспертами и Группой управления проектом для реализации был рекомендован вариант АРКА.

3.2. Рабочее проектирование

Начиная с 2006 года, компания "VINCI Construction Grands Projets" вела переговоры со строительными фирмами Украины о совместных работах по проектированию и строительству Нового безопасного конфейнмента. Организатором и модератором этих переговоров был президент Союза строителей Украины В. З. Борисовский. Французскую сторону представлял директор Департамента дезактивации и демонтажа компании "VINCI Construction Grands Projets" Жан-Луи Ле Мао. В переговорах участвовали: в качестве потенциального подрядчика - строительная фирма "Укрэнергострой", в качестве потенциального проектировщика - Украинский институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского.

Была достигнута договоренность о том, что в случае, если компания "VINCI Construction Grands Projets" получит подряд на строительство Нового безопасного конфейнмента, она будет привлекать переговорщиков в качестве субподрядчиков.

В сентябре 2007 года компании "VINCI Construction Grands Projets" и "Voуgues Travaux Publics", создали консорциум "NOVARKA" (50/50) и подписали с Чернобыльской атомной электростанцией контракт на реализацию проекта "Проектирование, строительство и

ввод в эксплуатацию Нового безопасного конфайнмента". Он предусматривал проектирование и строительство защитной оболочки в соответствии с вариантом АРКА.

В марте 2004 года был объявлен международный тендер на проектирование и строительство НБК. В ноябре 2004 года были раскрыты предложения от участников тендера. Выигравшим тендер подрядчиком, отвечающим за проектирование, закупки и строительство, стало совместное предприятие "NOVARKA". Контроль за ходом работ поручен Группе управления проектом (ГУП), состоящей из представителей ЧАЭС и консорциума фирм "Bechtel" и "Battelle Memorial Institute".

Субподрядчиками консорциума "NOVARKA" стали:

- группа заводов металлических конструкций "CIMOLAI" (Италия) - рабочий проект стадии КМД и изготовление стальных конструкций конфайнмента;
- фирма "PaR" (США) - проектирование и изготовление системы основных кранов;
- фирма "OKYANUS" (Турция) - детальное проектирование, поставка и установка обшивки из нержавеющей стали;
- фирма "Mammoet Transport BV" (Нидерланды) – разработка грузоподъемной системы и программного обеспечения для синхронизации работы канатно-домкратных подъемников грузоподъемностью 900 тонн и тянуще-толкающих гидродомкратов надвижки, выполнение работ по перемещению конфайнмента;
- проектное бюро "Jaillet-Rouby" (Франция) – конструкторские работы по проектированию НБК;
- Украинский институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского – адаптация проекта Нового безопасного конфайнмента к украинским строительным нормам, выполнение научно-технического сопровождения этого проекта, проектирование вентиляционной трубы НБК и вспомогательных конструкций.

Нормативное обеспечение

Специфика объекта как сложной технической системы состояла в том, что он в целом не отвечал нормативным требованиям для сооружений атомной энергетики, а нормативные требования действу-

ющих СНиП, ГОСТ, ДБН и т. п. по проектированию не могли быть совершенно корректно применены.

В связи с этим до перехода к рабочему проектированию НБК были созданы, согласованы и утверждены регулирующими органами Украины специальные документы, имеющие обязательный характер применительно к проектированию НБК. Главными из них были:

- SIP-P-TM-21-330-DC-101-01 "Проектные критерии и требования к НБК".
- SIP-N-LI-22-A500-CDS-001-01-ДБКП "Документ по безопасности в рамках концепции проекта ПК-1 НБК (ДБКП)".
- Приказ Госстоя Украины от 21 января 1998 года № 10 "Об утверждении карты сейсмического микрорайонирования промплощадки ЧАЭС".
- Основные нормативные требования и проектные характеристики землетрясений на промплощадке Чернобыльской АЭС.
- Основні нормативні вимоги та розрахункові характеристики смерчів для майданчика Чорнобильської АЕС (затверджені наказом Державного комітету України з будівництва та архітектури від 21 жовтня 2002 року № 64).
- Лист Держбуду України №3/19-19 від 08.07.05 «Основні нормативні вимоги й розрахункові характеристики землетрусів для проммайданчика Чорнобильської АЕС».

Для составления рабочего проекта NOVARKA привлекла конструкторское бюро "Jaillet-Rouby" (Орлеан, Франция), специализировавшееся на проектировании крупномасштабных сооружений из металла. Проектирование велось на основе требований Еврокода. Необходимые проверки и дублирующие расчеты выполнялись Украинским институтом стальных конструкций имени В. Н. Шимановского. В тех случаях, когда отечественные нормы не соблюдались, в проект вносились необходимые изменения. При этом, в соответствии с требованиями ДБКП, применялось консервативное решение, заключающееся в том, что конструкции должны одновременно удовлетворять требованиям и европейских, и национальных нормативных документов. Окончательные решения согласовывались с ГУП.

Используемым для моделирования конструкции программным обеспечением был комплекс HERGOS 8-ой версии, разработанный фирмой "Jaillet-Rouby", который является интерфейсом программного

кода HERCULES. Программный код HERCULES, который был разработан Французской контролирующей организацией "SOCOTEC", использовался как расчетное ядро. Все поверочные расчеты в Украине выполнялись при помощи программного комплекса SCAD.

Несущие конструкции

Основные несущие конструкции представляют собой пространственные арки пролетом 257,4 м, с высотой в центре пролета 108,9 м (рис. 21). Эти сквозные решетчатые трубчатые конструкции с расстояниями между поясами 12 м располагаются с шагом 12,5 м. Пояса ферм выполнены из труб диаметром 813 мм, толщиной от 12,5 мм до 45 мм. Несущие элементы арки имеют фрикционные соединения, осуществляемые при помощи высокопрочных болтов.

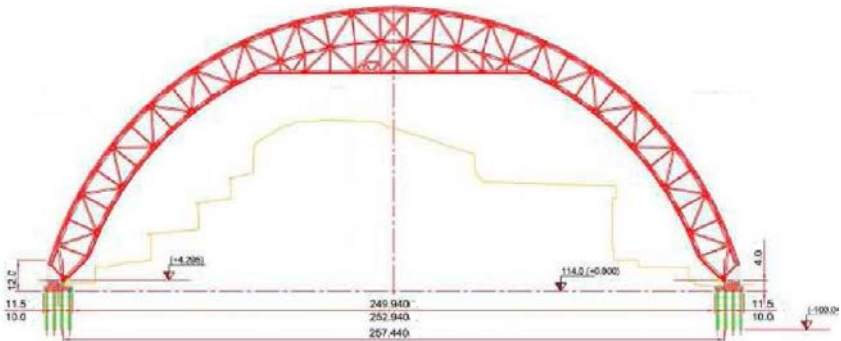


Рис. 21. Арка НБК

Основную часть составляют 13 арок, расположенных на осях А...N, кроме того, для организации торцевых стен предусматривается две дополнительные арки на осях А0 и N0, а из условий монтажа центральная арка по оси G проектируется сдвоенной. По рабочей схеме каждая такая конструкция представляет собой двухшарнирную арку, передающую распор на фундаменты. Они выполняются в виде железобетонных свайных ростверков, опирающихся на 350 буронабивных свай диаметром 1 м.

На отметке 85,093 м расположена горизонтальная плоскость из решетчатых балок, которая служит опорой для путей кранового оборудования. Каждый из двух подвесных трехопорных кранов грузоподъемностью 50 тонн перемещается по трем подкрановым балкам.

Краны могут работать раздельно или вместе. Они оснащаются различными устройствами (плазменной резки, грузозахватными, бурильными), предназначенными для демонтажа конструкций Саркофага.

Арки соединяются между собой системой связей по верхним и нижним поясам, которая вместе с конструкциями арок образует цилиндрический свод, работающий как пространственная сквозная цилиндрическая оболочка. По торцам цилиндрического свода предусматривается устройство стен, несущая часть которых тоже решена в форме сквозной конструкции.

Более подробное описание несущих металлических конструкций с иллюстрациями приведено в разделах 3.3 и 3.4.

НБК должен предотвратить попадание воды и снега, защитить от возможной утечки радиоактивности и создать условия, при которых будет возможным демонтаж Саркофага и разрушенного реактора.

Ограждающие конструкции

Герметичность конфайнмента обеспечивается обшивкой из нержавеющей тонколистовой стали. Обшивка играет не менее важную роль в функционировании конфайнмента, чем его каркас. Именно она является устройством, которое ограждает окружающую среду от вредных веществ, находящихся внутри конфайнмента.

Конфайнмент имеет наружную и внутреннюю обшивки. Наружная обшивка, имеющая толщину 0,6 мм, подвержена воздействию снега, ветра, смерча, ударам ледяных глыб при сходе замерзшего снежного покрова и тяжелых предметов, поднятых в воздух во время смерча. Надо принять во внимание, что ветер и воздействие смерча – нагрузки знакопеременные. Поэтому возможен отрыв листов обшивки, что очень опасно.

Наружная обшивка (рис. 22) поддерживается мощными толстолистовыми прогонами в виде прямоугольной трубы, опирающимися на трубчатые арки и работающими как неразрезная балка с пролетами по 12,5 м. На эти балки уложен усиленный оцинкованный профилированный настил. Далее идут поперечно уложенные элементы Ω -образного профиля, к которым прикреплены при помощи самонарезающих винтов высокие и прочные кляммеры для крепления обшивки. В уровне и по высоте Ω -образных элементов уложен слой плит-

ного утеплителя толщиной 50 мм. Поверх этого утеплителя и поверх Ω -образных элементов уложен слой пароизоляции. Затем уложен второй слой плитного утеплителя, а выше него – слой искусственного войлока. Этот войлок сверху прижимается профилированным листом нержавеющей стали. Он закрепляется к кляммерам при помощи специальной закаточной машинки.

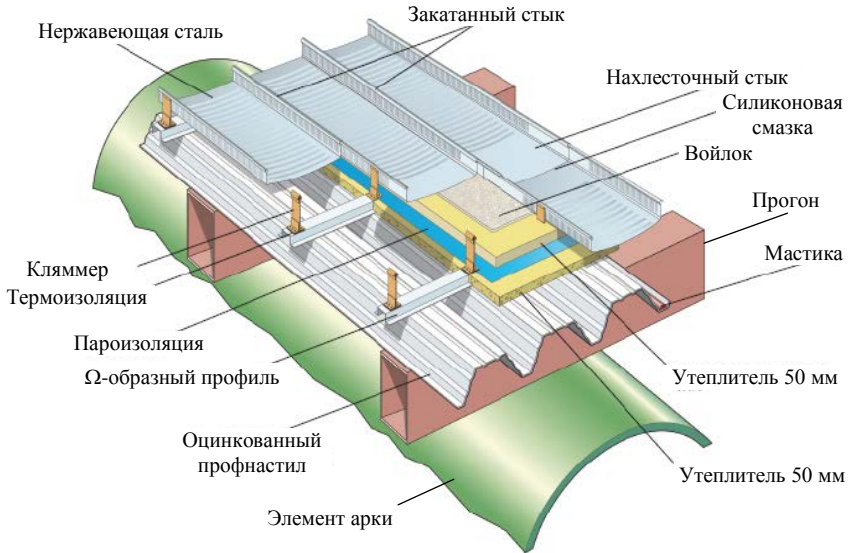


Рис. 22. Конструкция наружной обшивки

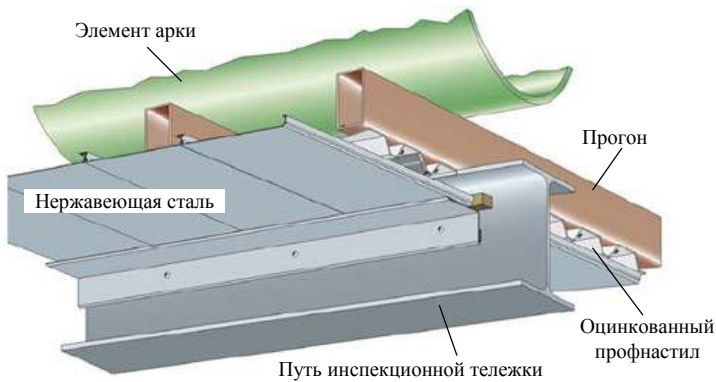


Рис. 23. Конструкция внутренней обшивки

Внутренняя обшивка (рис. 23) нагрузок практически не воспринимает. Она состоит из тонкого (0,5 мм) листа нержавеющей стали, профилированного в форме швеллера с отгибами, и слоя прорезиненного материала. Они крепятся к оцинкованному профилированному настилу, а тот – к неразрезным прогонам пролетом 12,5 м, имеющим форму прямоугольной трубы. Внутренняя обшивка ограждает междуарочное вентилируемое (так называемое кольцевое) пространство от внутреннего объема конфайнмента.

Защита от коррозии

Конструкция НБК рассчитана на срок службы, по меньшей мере, 100 лет без проведения ремонтных работ. По этой причине ответственные наружные конструкции выполнены из нержавеющей стали. К ним относится обшивка конфайнмента и вентиляционная труба. Кроме этого, внутреннее пространство конфайнмента также обшито нержавеющей сталью.

Для несущих конструкций из черного металла была принята концепция активной противокоррозионной защиты. Проектировщики целенаправленно расположили несущие конструкции между внешней и внутренней обшивками в междуарочном (кольцевом) пространстве, объем которого составляет около 1 млн. м³. Достаточно в этом пространстве поддерживать температуру и влажность воздуха в пределах, исключающих образование росы, – и коррозия черного металла будет практически исключена. За счет этого эффекта и была достигнута требуемая долговечность всего сооружения.

Проблема активной защиты конструкций от коррозии решалась в комплексе с проблемой защиты окружающей среды от проникновения радиоактивных пыли и газов из внутреннего пространства конфайнмента наружу. Во внутреннем пространстве конфайнмента должно поддерживаться пониженное давление (порядка –30 Па), предотвращающее выход радиации через шлюзы и оставшиеся неплотности. Такое давление обеспечивает фильтро-вентиляционная установка, постоянно прокачивающая поступающий в конфайнмент воздух через эффективные фильтры в вентиляционную трубу, и тем самым понижающая внутреннее давление в конфайнменте.

Между внутренним пространством конфайнмента и кольцевым пространством также существуют неплотности. Для того, чтобы предотвратить попадание сквозь них радиоактивных продуктов из-

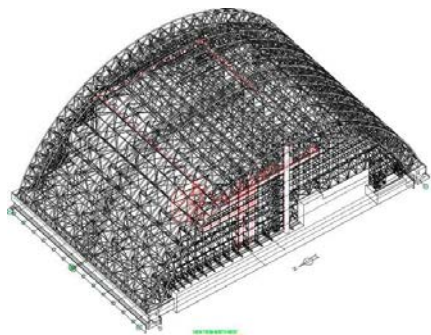
нутри конфайнмента в кольцевое пространство и сделать более надежным барьер между "грязной" внутренностью конфайнмента и окружающей средой, в кольцевом пространстве по проекту должна была поддерживаться не только относительная влажность воздуха не выше 40 %, но и избыточное давление порядка +50 Па. Поддержание избыточного давления особенно важно при прохождении смерча.

Таким образом, при проектировании Нового безопасного конфайнмента была впервые применена активная атмосферная защита металлических конструкций от коррозии.

Удаленная сборка конструкций

Сборка конструкций предусмотрена на участке в трехстах метрах от проектного положения, радиоактивный фон которого допускает работы без существенных ограничений. В этой позиции выполняется монтаж конструкций, кранов и другого оборудования, все проверки и наладки, а затем осуществляется надвигка готового сооружения на место постоянной установки над Саркофагом.

а)



б)

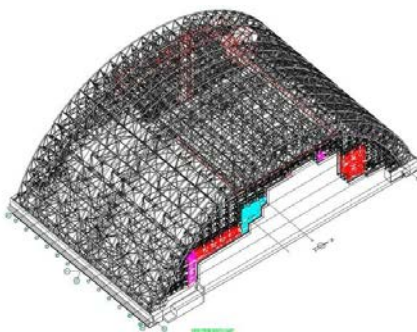


Рис. 24. Расчетная модель несущего каркаса:

а) вид со стороны западной стены; б) вид со стороны восточной стены

Восточная стена, которая при надвигке НБК в проектное положение должна пройти над существующими конструкциями объекта "Укрытие", имеет ряд откидных панелей (помечены цветом на рис. 24, б). Западная стена также подвешена к арочному своду, и в таком виде она существует во время сборки и надвигки конструкций НБК. Однако в районе центра арки в состав стены включена мощная стойка,

которая в проектном положении НБК поддомкрачивается и включается в работу на вертикальные нагрузки, передавая их на фундамент. Все прочие стойки остаются подвешенными, и по низу имеют только горизонтальные опоры.

Тестирование расчетных моделей и программного обеспечения

Нормы Украины, равно как и Еврокоды, базируются на использовании метода расчетных предельных состояний и в этом смысле принципиально не отличаются друг от друга. Однако в деталях, в том числе, и весьма важных, наблюдаются определенные различия. Они сосредоточены вокруг двух проблем:

- правил выбора расчетных сочетаний нагрузок;
- методологии проверки прочности и устойчивости элементов.

В связи с этим в процессе выполнения дублирующих расчетов большое внимание уделялось методике сопоставления результатов. Проверялось совпадение результатов по заранее выбранному набору внутренних усилий и перемещений. Кроме того, был выполнен модальный анализ и сопоставлены первые пять частот и форм собственных колебаний.

Вместо обычно используемой оценки расхождения

$$\Delta_x = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100 (\%),$$

сопоставление усилий и моментов выполнялось по правилам такого типа:

$$\Delta_{0N} = \frac{N_1 - N_2}{AR_d} \times 100 (\%), \quad \Delta_{0M} = \frac{M_1 - M_2}{WR_d} \times 100 (\%).$$

Расхождения между результатами, полученными при проектировании (программа HERCULES) и в процессе дублирующих расчетов, оказались незначительными. Поэтому в дальнейшем все расчеты выполнялись с помощью вычислительного комплекса SCAD.

Важной была проблема учета податливости основания. Основные фундаменты арок выполнены в виде железобетонного балочного ростверка на железобетонных сваях. Для такой конструкции по программе была получена матрица жесткости, которую после калибровки по данным испытания монтажной сваи вводили в программу

SCAD. Расчетная модель, в которой использована указанная матрица жесткости, называется моделью E1 (elastik-1).

Помимо этого, была рассмотрена расчетная модель E2 (elastik-2), в которой сваи были представлены стержневыми конечными элементами, опирающимися на упругие опоры, с помощью которых моделировалась работа грунтового основания. Данные о податливости оголовков свай для этой модели были получены в институте КИЭП во время расчета фундаментов.

И, наконец, была рассмотрена модель абсолютно жесткого основания R.

Таким образом, сопоставление выполнено для трех пространственных расчетных моделей. Оказалось, что расхождения между результатами расчета по трем расчетным схемам не принципиальны, и при расчете каркаса вполне возможно было не учитывать податливость основания.

Варианты нагружения

При расчете НБК возникла проблема очень большого числа вариантов нагружения. Вместо обычного числа в несколько десятков нагружений, пришлось вести расчет на 572 варианта нагружения.

Так, например, для выявления расчетных направлений ветра предварительно были указаны критерии отбора, такие как экстремальное перемещение вершины арки, максимальная разность смещений опор крана, экстремальные реакции в опорах арок и т. д. Так было найдено 42 расчетных направления ветрового потока.

Крановая нагрузка зависит от того, какой вариант сменного грузоподъемного оборудования используется (классическая тележка, защищенная тележка, тележка с тросовой подвесной системой, телескопическая мачта), и от того, в каком положении находятся краны и их тележки. Всего рассмотрено 11 положений мостовых кранов, и в каждом положении рассматривается 9 позиций грузовой тележки. Кроме того для каждого положения кранов как отдельные варианты нагружения рассматривались случаи действия вертикального давления колес крана и горизонтальные воздействия от продольного или от поперечного торможения. Итого пришлось рассматривать 324 нагружения крановыми воздействиями.

Одним из наиболее опасных оказалось воздействие от смерча. Проблематичным оказался вопрос об установлении интенсивности этой случайной нагрузки, поскольку статистика этого редкого явления еще не была наработана. Поэтому рассматривались и сопоставлялись различные методические приемы оценки смерчеопасности территорий, в том числе, и украинская методика, предложенная сотрудниками НИИСК – М. В. Сидоренко и Д. А. Коршуновым [19].

Нагрузка от смерча (рис. 25) представляется в виде суммы двух составляющих:

- нагрузка от перепада давления, не зависящая от направления движения смерча;
- нагрузка от скоростного напора, зависящая от направления движения.

Для нагрузки от смерча рассмотрено 196 вариантов нагружения, отличающихся положением оси смерчевой воронки и направлением перемещения этой оси. Для каждого положения воронки смерча рассматривается четыре направления движения.

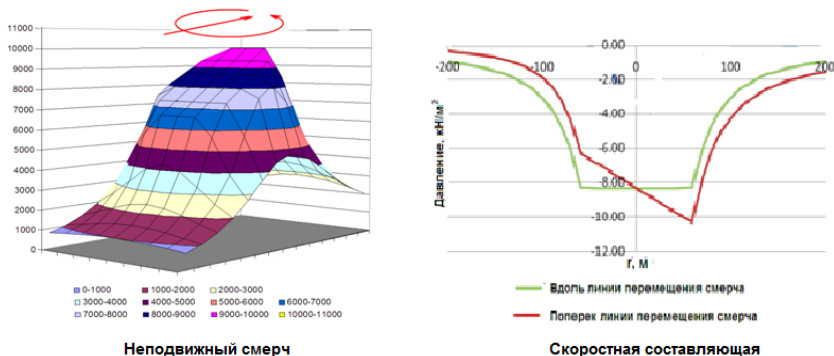


Рис. 25. Нагрузка от смерча

Внезапный сход снега с кровель неоднократно приводил к разнообразным повреждениям. При масштабах НБК этот процесс может походить на снежную лавину в горах (рис. 26).

Для схемы приложения нагрузок, показанной в правой части рис. 26, дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$\ddot{a} = (g/R) \sin \alpha - (\mu/R) (g \cos \alpha - R\dot{a}^2).$$

Решение этого уравнения показало, что скорость снега при соприкосновении с землей достигает 45 м/с. Это воздействие также входило в состав учитываемых нагрузок.

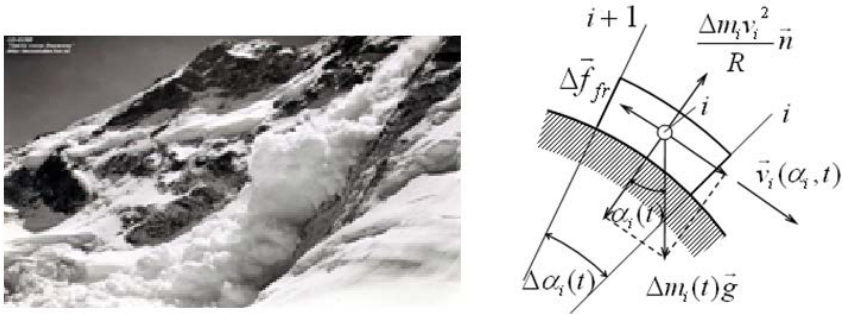


Рис. 26. Нагрузка от внезапного схода снега

Выбор расчетных сочетаний выполнялся в программе SCAD. Эта операция занимала наибольшее время (до трех часов).

По выбранным расчетным сочетаниям выполнялись все предусмотренные нормами проверки прочности и устойчивости. Практически всегда определяющими являлись расчетные сочетания аварийного режима работы, когда на НБК действовал смерч класса 3.0.

Методика проверки несущей способности

Поскольку на предварительной стадии проверка несущей способности выполнялась по методике Еврокода 3, а на заключительном этапе проектирования – по методике СНиП II-23-81*, то было выполнено их детальное сравнение.

Одним из существенных различий является то, что в Еврокоде имеется классификация поперечных сечений конструкций по их способности работать за пределом упругости и после местного выпучивания, в то время как в СНиП такая классификация отсутствует.

Методики проверок прочности и устойчивости поперечных сечений элементов по СНиП и Еврокоду во многих случаях достаточно существенно расходятся. Различается не только форма выполнения, но зачастую и комплекс учитываемых расчетных параметров. Типичным примером может быть проверка устойчивости сжатых элементов. В отличие от СНиП, где коэффициент продольного изгиба φ дифференцирован в зависимости от расчетного сопротивления, но

не зависит от формы сечения, начальных искривлений и случайных эксцентриситетов, в Еврокоде эти факторы учитываются напрямую.

Влияние смерча класса 3.0

Проверка на воздействие запроектного события в форме смерча класса 3.0 выполнялась в соответствии со специально разработанным техническим заданием в предположении обеспечения целостности обшивки основного защитного сооружения НБК. При этом:

- воздействие смерча класса 3.0 на НБК учитывалось в сочетании только с постоянными нагрузками;
- учитывалась возможность возникновения ограниченных пластических деформаций в элементах несущих конструкций основного защитного сооружения НБК и использования для этого формулы (49) из СНиП II-23-81*;
- не учитывались возможные локальные перенапряжения в узлах конструкций, которые не приводят к нарушению устойчивости основных несущих конструкций.

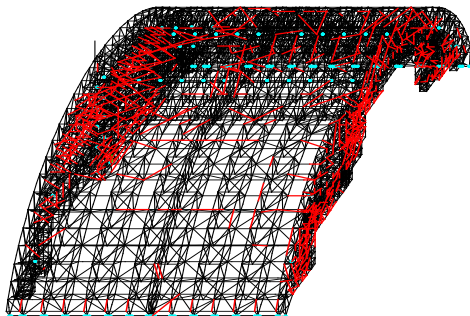


Рис. 27. Цветовая индикация результатов расчета на действие смерча

Результаты проверочных расчетов показали, что для многих элементов предварительно запроектированного варианта НБК не обеспечивается прочность или устойчивость. На рис. 27 эти элементы выделены красным цветом.

Обычно в инженерной практике принятые сечения мало отличаются от расчетных, и перерасчет системы с новыми сечениями элементов не выполняются. В данном случае было принято решение выполнить перерасчет с учетом изменившихся усиленных элементов. После перерасчета вновь оказалось, что требуется усиление некоторых

элементов НБК, и выяснилось, что количество требующихся итераций является неожиданно большим. По-видимому, такой результат связан с большим числом вариантов нагружения, когда после изменения жесткостей меняется расчетная комбинация нагрузок.

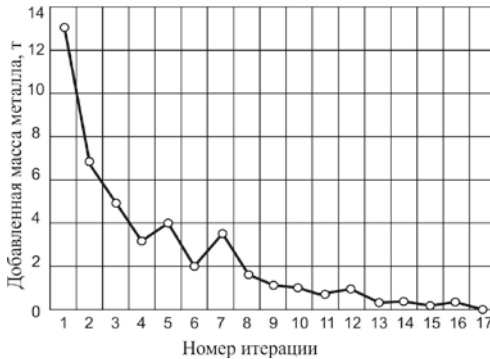


Рис. 28. Изменение добавляемой массы

При расчете на действие смерча пришлось выполнить 17 итераций (рис. 28). Дополнительный расход стали, который был необходим для всех требуемых замен сечений, составил 344,47 тонн (2,70 %).

Проверка на сейсмические нагрузки

Расчет по линейно-спектральному методу выполнялся традиционным способом, за исключением того, что использовался график спектрального коэффициента динамичности (рис. 29), разработанный Институтом геофизики им. С. И. Субботина Национальной академии наук Украины для площадки Чернобыльской АЭС.

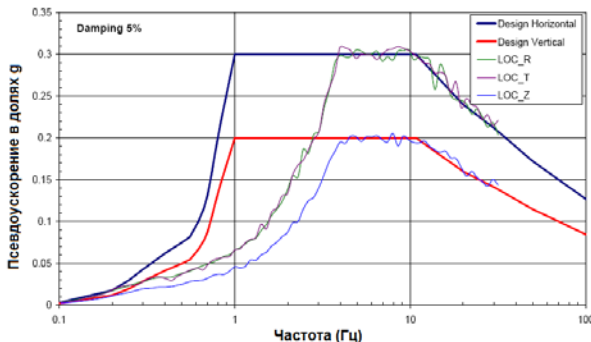


Рис. 29. Спектр Института геофизики

Этот график был введен в расчетную программу "Редактором коэффициентов динамичности" системы SCAD Office. При этом количество принимаемых во внимание форм собственных колебаний определялось в соответствии с указаниями п. 2.3.1 ДБН 1.1-12:2006, в соответствии с которым сумма модальных масс должна быть не менее 85 % полной суммы модальных масс при колебаниях в горизонтальном направлении и не менее 75 % – при колебаниях в вертикальном направлении.

Для сооружений такого уровня ответственности нормы Украины предусматривают выполнение прямого динамического расчета с использованием акселерограмм. Одновременно необходим расчет и по спектральному методу, а окончательно следует принимать более невыгодное решение.

а) ошибка в слове Акселерограмма

б)

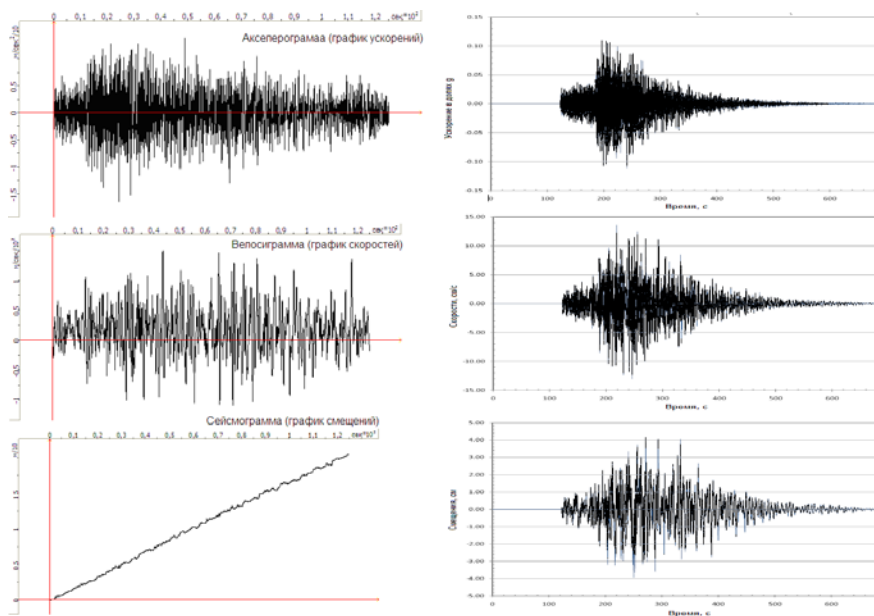


Рис. 30. Анализ акселерограмм: а) – исходные, б) – скорректированные

Трехкомпонентные акселерограммы расчетных землетрясений были представлены Институтом геофизики им. С. И. Субботина Нацио-

нальной академии наук Украины. Их проверка выполнялась редактором акселерограмм из SCAD Office. Оказалось, что эти акселерограммы не сбалансированы и приводят к постоянному тренду в диаграммах перемещений, что показано на рис. 30, а. На этом рисунке представлена исходная акселерограмма, ее первый интеграл (велосиграмма) и ее второй интеграл (сейсмограмма). Поэтому было принято решение выполнить корректировку исходных акселерограмм для всех временных диаграмм, представленных Институтом геофизики.

Специалистами GEODYNAMIQUE & STRUCTURE было проверено несколько схем корректировки исходного материала, и схемой, которая была выбрана окончательно, стала фильтрация верхних частот 4-го порядка с частотой 0,05 Гц. Аналогичные корректировки были выполнены и в программе "Корректировка акселерограмм", входящей в систему SCAD Office, где используется метод корректировки базовой линии. Результаты балансировки акселерограмм оказались схожими при использовании обоих методов: и фильтрация, и корректировка базовой линии привели к исчезновению тренда в картине смещений (рис. 30, б).

В расчете по акселерограммам учитывался эффект неодновременного возбуждения колебаний по основным рядам опирания арок. Использовалась гипотеза "замороженной акселерограммы", переносимой со скоростью распространения сейсмической волны.

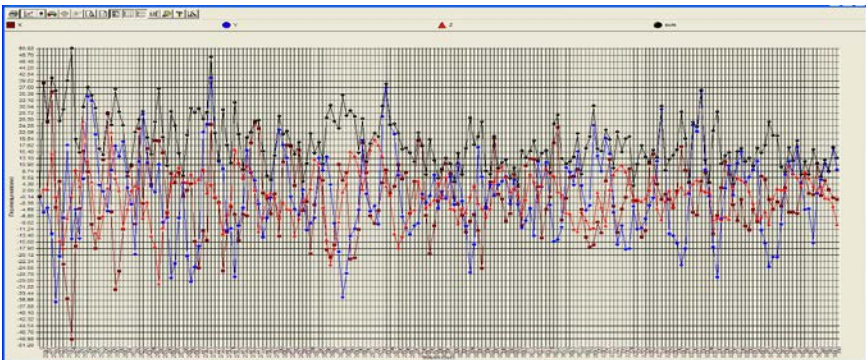


Рис. 31. График перемещений узла, соответствующих акселерограмме

При прямом интегрировании уравнений движения мы получаем слишком большое число результатов, которое очень трудно проана-

лизировать. Это число для узловых смещений: $4 \times CU \times CT$, где CU – число узлов, CT – число моментов времени, а для усилий в элементах: $6 \times CS \times CT$, где CU – число стержней, CT – число моментов времени. Как пример на рис. 31 представлен график перемещений одного из узлов НБК. При общем числе узлов 5947 и количестве элементов 13240 потенциальное число возможных графиков будет равно $5947 \times 4 + 13240 \times 6 = 103228$.

Не только инженерный анализ, но и сколь-нибудь полезное разглядывание всех их невозможны. Но поскольку расчет по акселерограммам носит поверочно-контрольный характер, то, с точки зрения оценки прочности и устойчивости конструкций, основную роль играет сопоставление результатов по двум методикам.

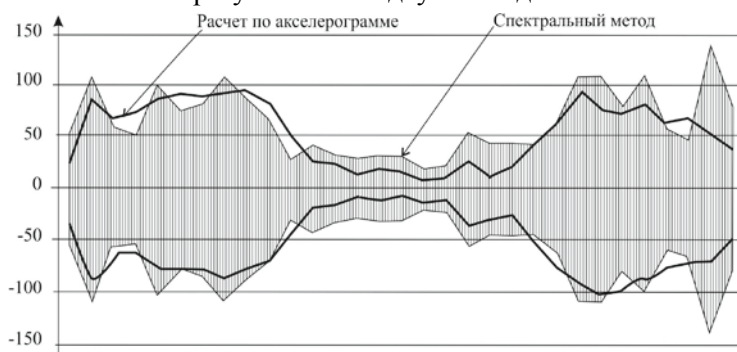


Рис. 32. Огибающие усилий вдоль нижнего пояса арки

Для сопоставлений были отобраны типичные элементы несущих конструкций. Для этих элементов были сопоставлены усилия, которые были вычислены при расчете по классическому спектральному методу, с усилиями, полученными при расчете по акселерограммам. Результаты сопоставления наглядно видны на графиках, представленных на рис. 32. Хорошая корреляция, скорее всего, связана с тем, что специальный график спектрального коэффициента динамичности построен на базе той же акселерограммы.

Из таких графиков видно, что для некоторых элементов наблюдаются превышения усилий, обнаруженных при расчете по акселерограммам, по отношению к расчетам по спектральному методу. Однако их величина мала по сравнению с несущей способностью элемента, поскольку определяющим фактором было воздействие смерча класса 3,0, а не сейсмическое воздействие.

Узловые соединения

По замыслу авторов конструкции ее стержневые элементы имели трубчатую форму. Это совершенно резонно, поскольку труба хорошо работает как на растяжение, так и на сжатие. Однако трубы не-легко соединять в узлах. NOVARKA приняла решение делать на концах труб прорези и вваривать в эти прорези плоские концевики, а затем концевики присоединять при помощи болтов и накладок к узловым фасонкам (рис. 33).



Рис. 33. Характерный узел соединения трубчатых элементов



Рис. 34. Концевик трубчатого элемента

Одной из нестандартных задач был расчет прочности концевика трубы (рис. 34) и его болтового соединения с фасонкой. Эту задачу решили по методу конечных элементов с учетом геометрической нелинейности в упругопластической стадии работы стали с использованием программы NASTRAN. Примеры визуализации результатов расчетов показаны на рис. 35. Количественные результаты расчетов показали достаточную надежность концевиков труб, примененных в проекте конфайнмента.

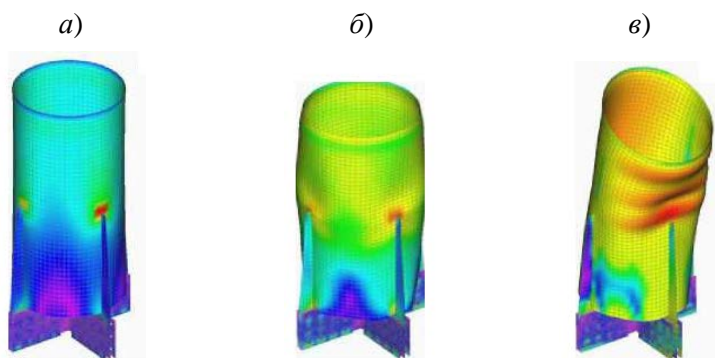


Рис. 35. Напряженно-деформированное состояние концевика трубы
а) при растяжении; б) при сжатии; в) при изгибе

Кроме тела трубы, проверялись и болтовые соединения трубчатого элемента с узловой фасонкой. Здесь нас ожидал некоторый сюрприз. Численным путем было установлено, что во фрикционных соединениях в работу включаются лишь болты крайних рядов, а болты промежуточных рядов не работают. Положение спасает тот факт, что эта закономерность исчезает, как только болты крайних рядов начинают проскальзывать. Для постоянных нагрузок полная несущая способность соединения восстанавливается. Однако при переменных, особенно при вибрационных нагрузках, болты крайних рядов вследствие многократного проскальзывания могут терять несущую способность и снижать общую прочность соединения. Впоследствии этот феномен нашел теоретическое подтверждение [13].

Все узловые соединения решены на высокопрочных болтах с контролем натяжения по срезу концевика (рис. 36), что в несколько раз снижает трудозатраты на монтаже [12].



Рис. 36. Болт со срезаемым концевым элементом

Особенность этого болта заключается в том, что при завинчивании гайки специальным гайковертом тело болта удерживается (от поворота) не за головку болта, а за концевой элемент. Момент затягивания гайки увеличивается до тех пор, когда концевой элемент срежется. Срезающий момент подобран так, что он равен требуемому моменту затяжки гайки. Никакого другого контроля, кроме визуального, не надо. Отсутствие у болта срезанного концевой элемент свидетельствует о том, что гайка должным образом затянута.

Было использовано 650 тысяч таких болтов диаметром 30 мм.

Вентиляционная труба

К западной стене конфайнмента крепится вентиляционная труба, через которую осуществляется выброс в атмосферу фильтрованного воздуха из внутреннего пространства конфайнмента на высоту 110 м над поверхностью земли. Труба представляет собой оребренную цилиндрическую оболочку диаметром 3,5 м из нержавеющей стали, подвешенную в верхней своей части и раскрепленную от горизонтальных смещений еще в трех уровнях. Фотографии трубы можно посмотреть в разделе 3.4.

Труба была запроектирована Украинским институтом стальных конструкций имени В. Н. Шимановского. В процессе проектирования были решены две нестандартные задачи.

Первая из них связана с определением ветрового воздействия на трубу. Обтекание потоком воздуха свободностоящего тела цилиндрической формы хорошо изучено. Известно, что кроме статического воздействия в виде лобового давления, цилиндрическое тело подвержено значительной динамической нагрузке, вызванной срывом вихрей.

Вентиляционная труба находится в непосредственной близости от стены конфайнмента, которая, как огромный парус, собирает потоки

воздуха и может усилить ветровое воздействие. Насколько велико будет это воздействие – никто не знает. Обычно такие исследования выполняют путем обдувки модели сооружения в аэродинамической трубе.

Вместо дорогостоящего эксперимента, было выполнено моделирование динамического процесса воздействия ветра при помощи компьютера. Задача оперировала с миллионами неизвестных величин и тысячами временных интервалов. Один из мгновенных снимков процесса, на котором видны вихри, показан на рис. 37.

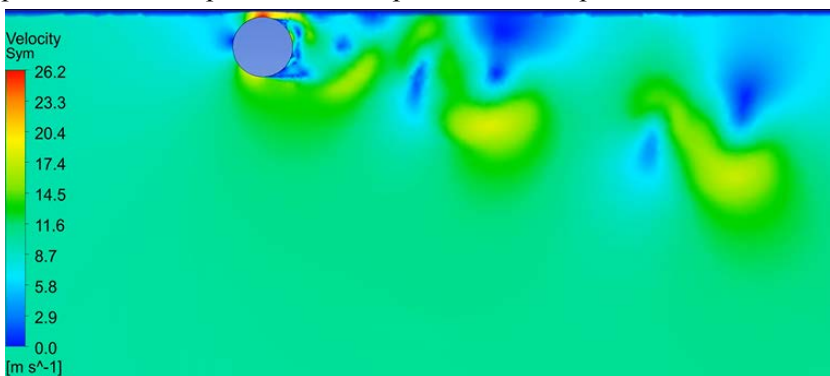


Рис. 37. Компьютерное моделирование обтекания вентиляционной трубы

Компьютер хорошо справился с решением задачи, хотя ему для этого потребовалось несколько суток непрерывной работы. Статические и динамические воздействия на трубу были определены и легли в основу расчетов. Максимальные скорости воздуха и давления оказались сосредоточенными в узкой щели между трубой и стенкой конфайнмента.

Вторая задача была связана с тем, что труба, расположенная на западной стене конфайнмента, сильно и неравномерно нагревается лучами заходящего солнца. От этого она пытается приобрести дугообразную форму, но опорные крепления этому препятствуют. В результате возникают заметные реакции опор и температурные напряжения в теле трубы. Для определения максимальных реакций и напряжений была решена задача о поиске неблагоприятного положения солнечного диска на небосводе с использованием закономерностей вращения Земли вокруг своей оси и перемещения ее по орбите вокруг Солнца [18].

Экспериментальная проверка обшивки

Что касается прогонов и профилированного настила, то их прочность была проверена расчетом. Проверку же кляммеров и обшивки из нержавеющей стали сложного профиля, прикатанной к кляммерам с большой степенью неопределенности, выполнить расчетом практически невозможно. Поэтому приняли решение определить эту прочность при помощи эксперимента. В качестве воздействий были приняты нагрузки от собственного веса и снега, а также активное и пассивное давление (отсос) от смерча. Программа испытаний с определением числа экспериментов по украинским нормам была разработана при участии института стальных конструкций. Испытания выполнялись в г. Сток-он-Трент (Великобритания) в научно-исследовательском центре керамической промышленности "CERAM".



Рис. 38. Сборка опытного образца для испытаний

а)



Рис. 39. Подготовка мешков для создания нагрузки

б)



Рис. 40. Образец после испытания:

а) – раскрытие фальца в первом цикле, б) – успешный результат

Опытные образцы в натуральную величину собирались в строгом соответствии с проектом (рис. 38). Для создания нагрузки использовались мешки, надуваемые воздухом до нужного давления, изготовленные при помощи "скотча" из рулонной полихлорвиниловой пленки (рис. 39). Эти мешки, расположенные под обшивкой, легко разрушали испытуемый образец, имитируя отсос (рис. 40). Первый цикл испытаний показал недостаточную надежность фальцевых соединений листов обшивки.



Рис. 41. Специально разработанный обжимной стык

Обжимной стык листов обшивки был усовершенствован, элементы захвата были расширены (рис. 41), что дало возможность воспринимать большую нагрузку типа отсос, возникающую при воздействии смерча. Повторные испытания, выполненные после корректировки конструкции замкового соединения фальцев, дали положительный результат.

Еще одно испытание в научно-исследовательском центре "CERAM" было проведено для проверки работы обшивки покрытия на падение ледяной глыбы, образующейся при сходе снежной лавины, или тяжелого предмета во время смерча.



Рис. 42. Груз на крюке крана



Рис. 43. Вмятина на ребре панели после падения груза

Само собой разумеется, что эта глыба или тяжелый предмет имеют неопределенную массу, неопределенную форму и неопределенную скорость. Однако испытателям надо было дать конкретное задание.

Совещание специалистов после длительных обсуждений решило, что испытание обшивки надо провести на падение груза овальной формы массой 15 кг со скоростью 10 м/сек, направленной перпендикулярно поверхности обшивки.

Грузы изготавливались из льда. Они представляли собой цилиндр с полусферической оконечностью диаметром 28,4 см с замороженной в него веревкой, слегка усеченный снизу, для того, чтобы он не катался по плоскости (рис. 42). Груз надо было уронить с высоты 5,1 м. Испытания прошли успешно. Грузы неоднократно роняли на ребро панели (рис. 43) и на ее гофры. Вмятины были существенны, но они не представляли опасности для прочности и целостности покрытия.

3.3. Изготовление конструкций

Выбор производителя

Очень важной проблемой был выбор завода металлоконструкций, который смог бы качественно и в срок поставить на монтаж 36 тысяч тонн стальных конструкций для строительства Нового безопасного конфайнмента. Нам, естественно, хотелось, чтобы эту поставку осуществлял украинский завод. Французской стороне предложили ознакомиться с индустрией изготовления металлоконструкций в Украине, а заодно побывать на нескольких металлургических заводах. Выбор пал на Житомирские заводы ЗМК и ЗОК, Днепропетровский завод металлоконструкций имени И. В. Бабушкина, Мариупольский и Донецкий заводы металлоконструкций, а также на металлургические комбинаты "Азовсталь" и имени Ильича в Мариуполе и на Алчевский металлургический комбинат.

По возвращении из поездки французские специалисты высказали свое мнение о том, что украинские заводы не смогут изготовить конструкции конфайнмента. В качестве причин они сослались на отсутствие оборудования по изготовлению толстостенных труб и на недостаточно высокую квалификацию сварщиков.

В конечном счете, NOVARKA остановила свой выбор на группе итальянских заводов металлоконструкций "CIMOLAI", расположенных в г. Порденоне и в ближайших к нему городах. Название фирмы – это фамилия бывшего рабочего Armando Cimolai, основавшего мастерскую по изготовлению металлических ворот и окон еще в 1949 году. В 1954 году CIMOLAI уже поставлял конструкции для

промышленных зданий. Теперь это огромный комбинат, работающий для 58 стран в области проектирования, поставки и монтажа сложных металлоконструкций, начиная от мостов и стадионов и заканчивая сооружениями для морских оснований и нефтегазовой промышленности. Заводы группы SIMOLAI имеют в своем штате 2600 сотрудников и производят 120–180 тысяч тонн металлоконструкций в год.

Один из заводов, расположенный в г. Сан-Джорджо-ди-Ногаро, является крупным производителем стальных прямошовных труб большого диаметра и толщины стенок. Он оборудован уникальным гибочным прессом с шириной зева 15,1 м и давлением на нож 6000 тс, который может делать заготовки для конструкционных труб длиной до 15 м, с наружным диаметром от 457 до 2032 мм (18"–80") и толщиной стенки от 9,53 до 88,9 мм (3/8"–3,1/2") (рис. 44).



Рис. 44. Гибочный пресс с шириной зева 15,1 м и давлением на нож 6000 тс

Превращение заготовки в трубу выполняется наложением единственного продольного шва сварочным автоматом.

NOVARKA заключила с группой заводов SIMOLAI субподрядный договор на выполнение рабочего проекта, изготовление и отгрузку металлоконструкций, а с Украинским институтом стальных конструкций – дополнительное соглашение на адаптацию рабочего проекта к украинским строительным нормам для стадии КМД.

Следует отметить, что заводское бюро для целей конструирования пользовалось программой ТЕКЛА, а конструктивные расчеты вы-

полняло с использованием программы EXCEL. Результатом работы программы ТЕКЛА были детальные рабочие чертежи, и требование их переработки по образцу отечественных КМД были чисто бюрократическими, но его пришлось выполнять.

Технология изготовления

Использовалась налаженная технология индивидуального изготовления труб нужного размера под каждый элемент. Для этого вырезалась листовая заготовка, ширина которой была равна длине трубчатой части стержня, изгибалась на прессе, приобретая форму незамкнутой боковой поверхности кругового цилиндра нужного диаметра. Продольный шов заваривался сварочным автоматом с использованием выводных планок, а затем концы трубы при помощи специального станка обрабатывались так, чтобы каждый торец имел форму круга, перпендикулярного оси трубы.



Рис. 45. Крестообразные концевые вставки



Рис. 46. Трубы с прорезями для концевых вставок

Для превращения в стержень кусок трубы оснащался крестообразными (или плоскими) концевыми вставками. Концы вставок, вставляемые в трубу, заужены, чтобы уменьшить вызываемую ими концентрацию напряжений (см. рис. 45), иначе в этих зонах трубы могли бы появиться трещины. Для вставок в трубе делались прорези с разделкой под сварку (рис. 46).

После этого концевая вставка помещалась в подготовленные заранее прорези, выверялась и фиксировалась в проектном положении (рис. 47). Далее концевые вставки приваривались полуавтоматической сваркой. Кроме вставок, приваривались заглушки для герметизации трубчатой части стержня.



Рис. 47. Подготовка концевой вставки под сварку

Следует отметить высокую культуру производства на заводе. Как пример можно привести фотографию аккуратно изготовленной пространственной узловой фасонки, весящей около двух тонн (рис. 48).



Рис. 48. Пространственная фасонка

Контрольная сборка

С тем, чтобы исключить неприятности на монтажной площадке, проект предусматривал выполнить контрольную сборку несущих конструкций конфайнмента еще на заводе. Наши специалисты были приглашены на первый этап контрольной сборки. Оказалось, что на заводе столь большой площадки не нашлось, и контрольная сборка выполнялась на территории какой-то стройки в нескольких километрах от завода. Собирался не весь конфайнмент и даже не целая арка, а лишь небольшой фрагмент каркаса. Фрагмент представлял

собой пространственный блок, составленный из средних третей двух соседних арок с соединяющими их связями (рис. 49).

Сборка фрагмента прошла без особых осложнений. Однако это был единственный фрагмент, собранный механическим путем. Остальная контрольная сборка выполнялась виртуально.



Рис. 49. Контрольная сборка пространственного блока

Основой для виртуальной сборки является трехмерная модель сооружения в программе TEKLA и детализированные чертежи, полученные на ее основе.



Рис. 50. Светоотражающий репер (показан стрелкой)

Идея виртуальной сборки заключается в том, что каждая изготовленная на заводе монтажная единица проходит фотограмметрический контроль с определением всех размеров, указанных на детализированном чертеже. При этом используются лазерные инструменты:

сканирующие, дальномерные и угломерные. С прецизионной точностью определяются координаты реперных точек, которые помечаются на изделии путем приклеивания к нему светоотражающих реперов (рис. 50).

Далее полученные размеры сличаются с размерами на детализированном чертеже, и проверяется соблюдение допусков. Затем, совмещая в компьютерной трехмерной модели реперные точки, идеальные (соответствующие чертежам) монтажные единицы заменяют на реальные, проверяя тем самым собираемость сооружения. В случае нестыковок исправляют металл.

Готовые конструкции морем отправлялись в Одессу, оттуда они перевозились на монтажную площадку автотранспортом.

3.4. Монтаж

Подготовительные работы

Территория строительства была разбита на 3 зоны – собственно, объект "Укрытие", монтажную зону и промежуточную зону. Работы начинались с расчистки и подготовки монтажной зоны, а также демонтажа существующих неэксплуатируемых сооружений. Для максимально возможного предотвращения образования радиоактивных отходов земляные работы, выполняемые в монтажной зоне, должны быть сведены к минимуму. С целью создания направляющих фундаментов арки были подготовлены две широкие траншеи. Площадка между траншеями выложена бетонными плитами, служащими опорой для подъемных башен, с помощью которых осуществляется монтаж конструкций.

Для обслуживания монтажной зоны созданы специальные подъездные пути. Затем, с заливки бетонной подушки, начинаются строительномонтажные работы. Параллельно в траншеях ведутся работы по устройству фундаментов глубокого заложения. Для этого применяются буронабивные сваи, которые составляют 1 м в диаметре и в среднем погружаются на глубину 18 м. В монтажной зоне выполняются арматурные работы и бетонирование фундаментных блоков подъемных вышек. В целях радиационной защиты персонала, задействованного в проекте, монтажная зона площадью около 90 тыс. м³ подсыпается чистым материалом, толщина которого составляет в среднем 1 м, и частично закрывается бетонными плитами. Они слу-

жат рабочей площадкой и защищают от возможного радиационного излучения, исходящего от земли.

Последовательность и выполнение монтажа

Затем начинается монтаж самой арки. Первые сегменты конструкции, предварительно собранные за пределами зоны монтажа, доставляются на площадку на многоколесных платформах (рис. 51). Каждый сегмент весит около 300 тонн и составляет около 25 м в высоту.



Рис. 51. Первый сегмент арки доставлен на площадку



Рис. 52. Перед началом подъема восточной части

Возведение арки начинается с верхней части. Сегменты соединяются между собой промежуточными связями и образуют центральную часть, на которую затем монтируется наружная обшивка. После этого доставляются следующие элементы арки, которые соединяются с центральной частью системой шарниров (рис. 52).



Рис. 53. 1-й подъем восточной части



Рис. 54. 2-й подъем восточной части

Первый подъем (рис. 53) осуществляется с помощью монтажных башен, которые позволяют поднимать грузы массой порядка

1000 тонн. Постепенно конструкция дополняется остальными элементами. Подъемные башни передвигаются для монтажа последних элементов, которые будут служить основанием арки (рис. 54). После этого устанавливаются специальные гидравлические тянуще-толкающие гидродомкраты, один такт работы которых дает перемещение 600 мм (рис. 55), обеспечивающие перемещение завершенной первой половины арки в зону ожидания (рис. 56), что позволяет освободить монтажную зону (рис. 57).



Рис. 55. Механизмы передвижения арки



Рис. 56. Перемещение восточной части в зону ожидания



Рис. 57. Монтаж западной части Рис. 58. Объединение обеих частей арки

Вторая (западная) половина арки собирается точно так же, как и восточная. Различия были только в части монтажа восточной и западной стен, конструкции которых существенно отличаются. После завершения монтажа второй половины арки первая половина перемещается в обратном направлении и стыкуется со второй половиной, завершая конструкцию (рис. 58). В последнюю очередь монтируются пространственные связи и укладывается металлическая обшивка. Объединенная конструкция остается на монтажной площадке, где

выполняются работы по монтажу конструкций восточной и западной стены НБК.

Монтаж вентиляционной трубы

На западной стене должна располагаться вентиляционная труба, проектирование и строительство которой постоянно откладывалось в связи с тем, что менялись идеи ее возведения. Сперва предполагался естественный метод монтажа, при котором она возводилась бы в процессе подъемов западной половины конфайнмента, подрастая одновременно тремя укрупненными участками. Но такая возможность была упущена, и остановились на методе укрупнительной сборки практически всей трубы в горизонтальном положении и ее установки в проектное положение одним подъемом на завершающей стадии строительства конфайнмента.



Рис. 59. Вентиляционная труба: общий вид и ее верхняя часть

Окончательный вариант проекта (рис. 59) был выполнен только в 2016 году. Он предусматривал, что труба будет подвешена к верху конфайнмента и раскреплена от горизонтальных перемещений еще в трех уровнях. Конструкция скользящих опор принята такой, что они препятствуют не радиальным, а тангенциальным перемещениям, что позволяет уменьшить сечения ребер жесткости.

Труба, имеющая массу около 100 т, была смонтирована 3 сентября 2016 года за один подъем (рис. 60). В подъеме были задействованы три гусеничных крана. Трубу надо было поставить на две опорные части, расположенные на отметке 100 м в непосредственной близости от вертикальной, уже облицованной стены. Эту прецизионную

работу выполняли крановщики высокой квалификации из Азербайджана. Учитывая инерционные свойства тяжелого груза, перемещения выполнялись очень медленно, со скоростью, составляющей сантиметры в минуту. Подъем длился целую смену.



Рис. 60. Монтаж вентиляционной трубы

Мостовые краны

Смонтированная арка оснащается уникальными мостовыми кранами, изготовленными по проекту фирмы "PaR" (США) и предназначенными для демонтажа сооружения объекта "Укрытие" и разрушенного реакторного блока. Краны перемещаются в продольном направлении, опираясь на три подкрановые балки.

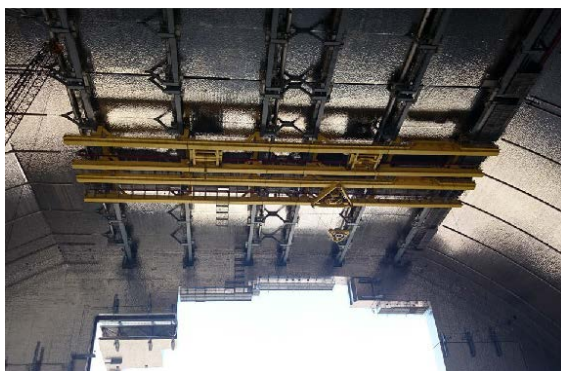


Рис. 61. Краны в смонтированном состоянии

Они собираются на земле и затем поднимаются с помощью лебедок, закрепленных на конструкциях арки, на высоте 85 м (рис. 61).

Надвижка конфайнмента

После выполнения отделочных работ и проведения предварительных испытаний арка перемещается на 327 м с помощью домкратов в проектное положение (рис. 62). Использовалась технология надвижки, уже апробированная при сближении половин НБК.



Рис. 62. Надвижка НБК на Саркофаг

Надвижка выполнялась со скоростью 10 метров в час, но в процессе работ предусматриваются технологические перерывы, поэтому она продолжалась с 14-го и до 27-го ноября 2016 года.

Герметизация стыков

Важной проблемой было осуществление плотного стыка между восточной стеной конфайнмента и существующими конструкциями АЭС. Для этого на восточной стене были предусмотрены специальные откидные панели, упомянутые ранее в разделе 3.2. Это оригинальное решение было впервые реализовано на таком крупном и ответственном объекте.

В ходе надвижки откидные панели удерживались в открытом положении и были подняты на достаточную высоту, обеспечивающую зазор в 500 мм над самым высоким препятствием (рис. 63). Установка откидных панелей в проектное положение была осуществлена с помощью монтажных лебедок и системы вертикальных и поперечных домкратов, установленных при сборке НБК.



Рис. 63. Восточная стена с поднятыми откидными панелями

После надвигки арки и установки откидных панелей в проектное положение по всей длине поверхности контакта с существующими сооружениями и вновь возведенными конструкциями объекта "Укрытие" оставлен промежуток примерно в 1 метр, достаточный для того, чтобы выдержать максимальные дифференциальные перемещения между НБК и этими конструкциями.

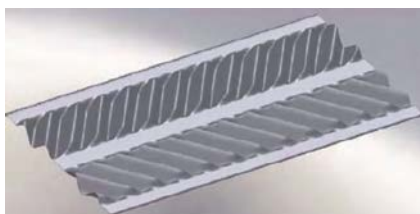


Рис. 64. Мембраны герметизации "шевронного типа"

Герметизация этого зазора была осуществлена при помощи мембран герметизации (рис. 64). Для этого французской компанией "CNIM" были изготовлены особые полиуретановые мембраны. Форма мембран "шевронного типа" такова, что при возникающих деформациях НБК на существующие конструкции передается лишь незначительная нагрузка.

Заключительные работы

В течение года были проведены окончательные работы: герметизация, монтаж вспомогательных помещений и оборудования, и в декабре 2017 года Новый безопасный конфайнмент был введен в опытно-промышленную эксплуатацию.



Рис. 65. НБК в проектной позиции

Это было самое большое из когда-либо перемещенных наземных сооружений (рис. 65). Общая масса стальных конструкций этого сооружения составила 36 200 т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по созданию Саркофага и по возведению Нового безопасно-го конфайнмента являются уникальными для мировой практики строительства. Трудно перечислить все рекорды, которые при этом были побиты. Представляется, что изучение полученного опыта может оказаться полезным не только в случаях радиационных аварий или при масштабных аварийно-восстановительных работах, но и в практике "обычного" строительства. При этом следует также иметь в виду и результаты научных исследований, которые выполнялись в связи с задачами, возникающими при создании защитных сооружений ЧАЭС. Ниже мы попытались указать лишь на некоторые элементы упомянутого опыта, представляющие такого рода расширенный интерес применительно к стальным конструкциям.

Заслуживает внимания и широкого использования в производстве стальных конструкций технология виртуального контроля собираемости, заменяющая собой физическую контрольную сборку, которая была широко апробирована при изготовлении конструкций НБК. Нам представляется, что "цифровая сборка" может стать стандартной процедурой на заводах металлоконструкций.

Реальная сборка конструкций, выполненная с использованием 650 000 высокопрочных болтов, у которых контроль затяжки достигается за счет среза хвостовика, показала эффективность соединения такого типа и его технологичность. По-видимому, такие соединения заслуживают самого широкого внедрения в практику.

При конструировании тонколистовых обшивок может найти применение апробированная в экспериментах конструкция фальцевых соединений высокой прочности, технология реализации которых отлажена на практике.

С методологической точки зрения, большой интерес представляет метод ретроспективного анализа перегрузок [8, 33], использованный для оценки надежности конструкций Саркофага в условиях неопределенности сведений о состоянии недоступных для осмотра конструкций, в основе которого лежит установление максимального

параметра нагружения, зафиксированного в прошлом. Эта величина служит критерием "доказанной" прочности конструкции при определении вероятности отказа в будущем.

Другой методологической находкой является предложенный в работах [30, 40] метод определения запаса времени, имеющегося для ликвидации повреждений, при условии, что вероятность отказа поврежденной конструкции будет такой же, как и у вновь проектируемой.

В дискуссиях о конструкции НБК обсуждались бесшарнирные болтовые соединения. В работе [13] был выполнен детальный анализ этой проблемы и показано, что при отсутствии проскальзывания в многорядном соединении работают только крайние ряды болтов, а также были указаны границы изменения переменных нагрузок, при которых обеспечивается работоспособность соединения.

Ряд задач, решавшихся при проектировании НБК, содержал элементы исследования, которые имеют не только локальное (для НБК) значение. К их числу принадлежат:

- задача о динамическом действии внезапного схода снега с поверхности арки, когда скорость движения достигает 40 м/с и скольжение завершается полетом;
- численное решение задачи об обтекании конструкции потоком воздуха взамен испытания в аэродинамической трубе, которое было выполнено в связи с определением ветровой нагрузки на трубу, расположенную у стены НБК;
- исследование влияния несинхронности движения опор при воздействии землетрясения на конструкцию, у которой расстояние между опорными точками сопоставимо с длиной сейсмической волны [5];
- решение задачи о неравномерном нагреве поверхности объекта солнечными лучами в зависимости от положения солнца на небосводе [18].

Одним из главных выводов общего характера является понимание того факта, что проблема обеспечения безопасности сложных и ответственных сооружений носит общенаучный характер. Так, на протяжении длительного времени в технике господствовало мнение об экономичности использования объектов большой единичной мощности. Но было замечено, что рост единичной мощности машин, агрегатов, сооружений и установок, чаще всего, не сопровождается

таким же ростом их надежности, и это может привести к масштабным потерям, как, например, во время Чернобыльской катастрофы. В работе [31] представлена простая модель для анализа этого явления и показано, что имеются пределы роста, которые, в принципе, можно вычислить.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алекс Х.Б. Оценка применения норм по обеспечению сейсмостойкости для проекта большепролетного арочного сооружения над объектом "Укрытие" [Текст] / Х. Б. Алекс, С. Н. Кондратьев, В. Б. Крицкий, Д. И. Рыжов, А. П. Шугайло // Будівельні конструкції, К.: НДІБК, 2005. Т. 2 – С. 89 – 95.
2. Александров А. П. Развитие уран-графитовых канальных реакторов в СССР [Текст] / А. П. Александров, Н. А. Доллежалъ // Атомная энергия. – 1977. – Т. 43, вып. 5. – С. 337–343.
3. Арошенко М. М. Тайны стальных конструкций (воспоминания, размышления, прогнозы) [Текст] / [М. М. Арошенко, В. Н. Гордеев, И. Н. Лебедич, А. В. Шимановский (ред.)] – К.: Сталь, 2004. – 304 с.
4. Баженов В.А. Оптимизация формы большепролетных арочных покрытий [Текст] / В. А. Баженов, В. К. Цыхановский // Будівельні конструкції, – К.: НДІБК, 2001. Вип. 54 – С. 93 – 99.
5. Баженов В. А. Исследование влияния асинхронных сейсмических колебаний опор арочного свода на динамическую реакцию [Электронный ресурс] – / [В. А. Баженов, П. П. Лизунов, Ю. И. Немчинов, А. В. Перельмутер, С. Ю. Фиалко] // Тезисы докладов VI Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием: Сочи, 19–24 сентября 2005 г. – Электронные данные. – М.: ВНИИТПИ, 2005. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
6. Бамбура А. Н. Расчетное обоснование мероприятий по усилению кровли и опор кровли объекта "Укрытие" [Текст] / А. Н. Бамбура, И. Р. Сазонова, В. М. Богдан // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 1997. – С. 8–13.

7. Бамбура А.Н. Особенности расчета на сейсмические воздействия балки «Мамонт» и ее опор в рамках проекта стабилизации SIP объекта «Укрытие» / [Текст] А. Н. Бамбура, И. Р. Сазонова, В. М. Богдан, Н. Г. Марьенков // Будівельні конструкції, К.: НДІБК, 2005. Т. 2 – С. 249 – 254.
8. Белоусов Е. Л. Стратегия поэтапной стабилизации объекта "УКРЫТИЕ-1" [Текст] / Е. Л. Белоусов, М. И. Сидоренко // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения: научно-технический сборник. – К.: Наукова думка, 1996. – Вып. 4. – С. 52–58.
9. Беляев И. А. Бетон марки "Средмаш" [Текст] / И. А. Беляев. – М.: ИздАТ, 1996. – 292 с.
10. Верюжский Ю. В. Методы анализа безопасности объекта "Укрытие" [Текст] / Ю. В. Верюжский // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения: научно-технический сборник. – К.: МинЧС, 1998. – Вып. 6. – С 58–70.
11. Верюжский Ю. В. Моделирование конструкций РМБК-1000 на стадии запроектной аварии [Текст] / Ю. В. Верюжский // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения: научно-технический сборник. – К.: МинЧС, 1998. – Вып. 6. – С. 29–44.
12. Гладштейн Л. И. Высокопрочные болты для строительных стальных конструкций с контролем натяжения по срезу концевго элемента [Текст] / [Л. И. Гладштейн, В. М. Бабушкин, Б. Ф. Какулия, Р. В. Гафуров] // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 5. – С. 11–13.
13. Гордеев В. Н. Особенности работы многорядных фрикционных соединений на высокопрочных болтах [Текст] / В. Н. Гордеев // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – К.: Видавництво "Сталь", 2010. – Вип. 5. – С. 172–180.
14. Гордеев В. Н. Участие института имени В. Н. Шимановского в ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Часть 1. Объект "Укрытие" [Текст] / В. Н. Гордеев // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – К.: Видавництво "Сталь", 2019. – Вип. 23. – С. 129–142.

15. Гордеев В. Н. Участие института имени В. Н. Шимановского в ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Часть 2. Новый безопасный конфайнмент [Текст] / В. Н. Гордеев // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – К.: Видавництво "Сталь", 2019. – Вип. 24. – С. 126–163.
16. Ищенко И. Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций 4-го энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии [Текст] / [И. Г. Ищенко, К. И. Анкянец, С. Ю. Фиалко, М. Н. Скуратовский, Н. Ю. Анкянец] // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения: научно-технический сборник. – К.: МинЧС, 1998. – Вып. 6. – С. 51–58.
17. Козлова Е. А. Схватка с неизвестностью. К 25-летию Чернобыльской катастрофы и 25-летию сооружения объекта "Укрытие" [Текст] / Козлова Е. А. – М.: ИздАт, 2011. – 624 с.
18. Кордун О. І. Визначення кількості сонячної радіації, що потрапляє на поверхню будівлі чи споруди [Текст] / О. І. Кордун // Промислове будівництво і інженерні споруди. – 2014. – № 2. – С. 2–7.
19. Коршунов Д. А. Методики оценки смерчопасности / Д. А. Коршунов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 1. – С. 61–64.
20. Круковский П. Г. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации) [Текст] / [П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко, В. А. Краснов, В. П. Сулимов, В. Г. Бороздин, В. Г. Поклонский] – Киев, 2019. – 296 с.
21. Купный В. И. Объект "Укрытие": вчера, сегодня, завтра [Текст] / В. И. Купный // Объект "Укрытие" – 10 лет. Основные результаты научных исследований. – Чернобыль: МНТЦ "Укрытие", НАНУ, 1996. – С. 57–77.
22. Курносов В. А. Захоронение 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС [Текст] / В. А. Курносов, В. М. Багрянский, И. К. Моисеев //Атомная энергия. – 1988. – Т. 64, № 4. – С.248–254.
23. Махінько А. В. Імовірносний розрахунок баштових опор зв'язку / А. В. Махінько. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 410 с.

24. Мельников Н. П. Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов [Текст] / Мельников Н. П. – [2-е изд., доп. и перераб.] – М.: Атомиздат, 1972. – 549 с.
25. Немчинов Ю. И. От Укрытия до Конфайнмента четвертого блока Чернобыльской АЭС. Строительные аспекты [Текст] / [Ю. И. Немчинов, П. И. Кривошеев, М. В. Сидоренко и др.] – К.: "Логос", 2006. – 464 с.
26. Немчинов Ю. И. Оценка состояния конструкций блока "В" II-й очереди ЧАЭС и рекомендации по обеспечению ее сейсмостойкости [Текст] / [Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. М. Лисеный, Ю. В. Смирнов, Е. И. Стаковиченко, А. А. Ищенко., А. Э. Клейн, М. С. Казаков, В. А. Швецов, Л. Г. Лукина, В. А. Баженов, А. Г. Топор, И. М. Сидненко, Г. Я. Запольский, А. В. Перельмутер, А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, В. М. Сеймов, Б. Н. Островерх] // Материалы 2-й Международной научно-технической конференции. – Славутич: 1997. – С. 150–155.
27. Немчинов Ю. И. Оценка риска обрушения строительных конструкций объекта "Укрытие" при землетрясении [Текст] / [Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, Е. И. Стаковиченко, В. Г. Поклонский] // Проблемы Чернобыля: научно-технический сборник. – Чернобыль: 1999. – Вып. 5. – С. 88–92.
28. Описание объекта "Укрытие" и требования к его преобразованию [Текст] // МинЧернобыль Украины, Академия Наук Украины. – К.: Наук. Думка, 1992. – 50 с
29. Перельмутер А. В. Из опыта расчетов нового безопасного конфайнмента Чернобыльской АЭС [Текст] / А. В. Перельмутер // Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно научно-исследовательского центра СтаДиО. – М: Изд-во АСВ, 2016. – С. 463–477.
30. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. – 256 с.
31. Перельмутер А.В. Об одной концепции в теории сооружений [Текст] / А. В. Перельмутер // Металлические конструкции. – 2010. – № 4. – С. 233–238.

32. Поляк В. С. Из опыта создания саркофага Чернобыльской АЭС [Текст] / В. С. Поляк // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 5. – С. 22–24.
33. Сидоренко М. В. Научно-технические проблемы прогноза надежности строительных конструкций в условиях ограниченной информации об их фактическом состоянии (на примере конструкций, поврежденных при аварии на 4-м блоке ЧАЭС) [Текст] / Сидоренко М. В. // Збірник матеріалів Першої Всеукраїнської науково-технічної конференції "Аварії на будівлях і спорудах та їх попередження". – К.: 1997. – С 63–68.
34. Сидоренко М. В. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций западного каркаса [Текст] / [М. В. Сидоренко, А. Н. Бамбура, Л. Ф. Вознесенский, И. Р. Сазонова] // Проблемы Чернобыля: научно-технический сборник. – Чернобыль: 1999. – Вып. 5. – С. 88–92.
35. Шимановский А. В. Численное исследование опорных конструкций балок Б1, Б2 покрытия объекта "Укрытие" в осях 50-Ж [Текст] / А. В. Шимановский, Н. А. Сирота, М. В. Герасимова // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения: научно-технический сборник. – К.: МинЧС, 1998. – Вып. 6. – С 79–85.
36. Boutillon L. The Chernobyl new safe confinement: an exemplary contribution by French companies [Text] / L. Boutillon, M. Wastiaux, D. Coulet – IABSE Congress Stockholm, 2016. – 7 p.
37. Hoorpah W. The steel arch structure for Tchernobyl NSC: Comparative calculation with EC and Ukrainian standards [Text] / W. Hoorpah, A. V. Perelmutter // EUROSTEEL 2011: Proceedings of 6-th European conference on steel and composite structures; August 31 – September 2, 2011, Budapest, Hungary.
38. Kondra M. P. Integral estimate of risk under wind action upon structures of the encasement at Chernobyl atomic power plant [Text] / [M. P. Kondra, O. V. Kопiiiko, M. A. Mikitarenko, A. V. Perelmutter, V. A. Prusov] // Proceeding of the 2nd European & African conference on wind engineering; Genova, Italy, June 22–26, 1997. – SGE Ditoriali, Padova, 1997. – Vol. 2. – P. 1833–1839.

-
39. Perelmuter A. V. Assessment of the tornado impact on the Chernobyl new safe confinement [Text] / A. V. Perelmuter // Magazine of civil engineering. – 1996. – Vol. 220, № 5. – P. 18–26.
 40. Perelmuter A. V. The assessment of damages and revival of serviceability of exhaust stack at Chernobyl nuclear power plant [Text] / [A. V. Perelmuter, M. P. Kondra, M. A. Mikitarenko, G. P. Denisenko, P. P. Turchin] // Proceedings of the first international conference on advances in structural engineering and mechanics, Seoul. – Taejon, Korea: Techno-Press, 1999. – P. 151–156.
 41. Schwob A. Chernobyl: An arch for history [Text] / A. Schwob, D. Coulet, M. Wastiaux. – Travaux (Paris), 2013. – Num 899. – P. 30–36.
 42. Veryuzsky Yu. V. Theoretical and practical methods for research of structures for extreme environment [Text] / Yu. V. Veryuzsky // The first international design of extreme environments assembly. – University of Houston. P/D/C. 3.1.2, 1991.
 43. Veryuzsky Yu. V. Analysis of the Risk Ecologically Hazardous Systems [Text] / Yu. V. Veryuzsky, V. Tokarevsky // Аеропорти та їх інфраструктура: Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. “Авіа-2003”. – К.: НАУ, 2003. – Т.4. – С. 421–422.

Научное издание

**Гордеев Вадим Николаевич,
Перельмутер Анатолий Викторович**

**Стальные конструкции защитных сооружений
Чернобыльской атомной электростанции**

Дизайн и верстка авторские

Подписано к печати 26.05.2020 г. Формат 60x84/16.

Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 4,62. Тираж 100 экз. Заказ 125.

ООО "Издательство "Сталь".

Свидетельство ДК №4947 от 30.07.2015 г.

г. Киев, ул. Виталия Шимановского, 2/1,
тел./факс. 229-83-51, 516-45-02, 516-55-92.

E-mail: tov_steel@ukr.net

www.steel-izdat.com.ua.