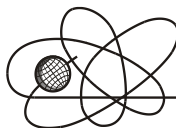




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2001-06

Preprint IBRAE-2001-06

С. А. Богатов

**ОЦЕНКА РАДИОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИИ, СВЯЗАННОЙ С ОБРУШЕНИЕМ
КРОВЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТА
«УКРЫТИЕ»**

Москва
2001

Moscow
2001

Богатов С.А. ОЦЕНКА РАДИОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ, СВЯЗАННОЙ С ОБРУШЕНИЕМ КРОВЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ». Препринт № IBRAE-2001-06. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2001. 29 с. — Библиогр.: 23 назв.

Аннотация

В работе сделана попытка максимально реального описания механизмов обрушения кровельных конструкций объекта «Укрытие» (аварийного 4-го энергоблока ЧАЭС) а также процессов подъема и распространения пылевого облака за пределы объекта. Расчет ожидаемых концентраций пыли в приземном слое воздуха проводился двумя методами – в рамках рекомендаций нормативного документа ОНД-86 и динамической камерной модели. Полученные значения интегральных концентраций пыли удовлетворительно совпадают для обеих моделей. Ожидаемые ингаляционные дозы для персонала, находящегося около объекта, по порядку величины составят несколько бэр, остальные пути облучения не существенны. Сформировавшийся радиоактивный след и открытый «развал» объекта будут являться источниками вторичного пылеподъема и формирования опасного вторичного загрязнения воздуха.

©ИБРАЭ РАН, 2001

Bogatov S. ASSESSMENT OF RADIOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE ACCIDENT INDUCED BY SHELTER ROOFING COLLAPSE (in Russian). Preprint IBRAE-2001-06. Moscow: Nuclear Safety Institute RAS, April 2001. 29 p. — Refs.: 23 items.

Abstract

An assessment has been done to describe adequately ways of the Shelter roofing collapse (accidental Unit 4 of the ChNPP) as well as lifting and penetration of dust cloud out of the Unit. Expectable air dust concentrations were calculated by two methods – accordingly standard OND-86 recommendations and dynamic compartment model. Integral dust concentrations are similar for both models. Inhalation doses to personnel near the Unit may be of several rem by the order of magnitude, other ways of irradiation are insignificant. Radioactive fallouts and open “ruins” of the Shelter may be sources of dust resuspension and of hazardous air contamination.

©Nuclear Safety Institute, 2001

Оценка радиологических последствий аварии, связанной с обрушением кровельных конструкций объекта «Укрытие»

Богатов С.А.

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: (095) 955-22-36, факс: (095) 958-11-51, эл. почта: sbg@ibrae.ac.ru

Содержание

Содержание	3
1. Введение.....	3
2. Сценарии обрушения строительных конструкций.....	4
2.1. Наиболее уязвимые строительные конструкции [2]	4
2.1.1. Западная зона.....	4
2.1.2. Южная зона	4
2.1.3. Разделительная стена между ОУ и блоком “В”	4
2.1.4. Северная зона	5
2.2. Сценарии разрушения кровельных конструкций ОУ	5
3. Вынос пылевого облака за пределы объекта	11
3.1. Образование пылевого облака после обрушения	11
3.2. Осаждение пыли из облака	12
3.3. Вынос пыли за счет естественной вентиляции	12
3.4. Зависимость пылевого выброса от времени года	14
3.5. Вынос за пределы ОУ	14
3.6. Оценка высоты подъема пылевого облака	15
3.6.1. Кинематический расчет	15
3.6.2. Расчет высоты подъема облака по эмпирическим формулам.....	15
4. Расчет концентрации примеси в приземном слое воздуха при обрушении кровельных конструкций ОУ	17
4.1. Расчет по методике ОНД-86.....	17
4.2. Расчет максимальных концентраций аэрозоля при аварийном выбросе.....	17
4.2. Осаждение примеси на грунт	19
5. Динамическая модель выброса	20
5.1. Формирование и характеристика аэродинамической тени здания объекта «Укрытие»	20
5.2. Время существования примеси в области аэродинамической тени	21
6. Максимальные радиологические последствия обрушения кровельных конструкций ОУ.....	24
6.1. Расчет максимально ожидаемого ингаляционного поступления.....	24
6.2. Внешнее облучение.....	25
6.2.1. Внешнее облучение при нахождении внутри пылевого облака	25
6.2.2. Внешнее облучение при нахождении на радиоактивном следе	25
6.3. Вторичный пылеподъем	26
6.3.1. Вторичный пылеподъем с площади радиоактивного следа	26
6.3.2. Вторичный пылеподъем с открытого “развала” после обрушения	26
7. Заключение	27
Литература.....	28

1. Введение

По существующим представлениям, наибольший потенциальный риск на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС (ОУ) представляет гипотетическая авария, связанная с обрушением кровельных кон-

струкций и выбросом радиоактивной пыли в непосредственной близости от объекта. По оценкам [1] данная авария вполне может быть вызвана 5 бальным (по шкале MSK-64) землетрясением, вероятность которого составляет около 10^{-2} год.

Таким образом, риск данного события достаточно велик. С другой стороны, мероприятия, способные предотвратить пылевой выброс, как то – аварийная быстродействующая система пылеподавления, долговременная фиксация пыли на поверхностях в подкровельном пространстве объекта и т.п. – являются крайне дорогостоящими и трудно осуществимыми в реальных условиях мероприятия.

Необходимость подобных мероприятий обосновывается расчетными величинами ожидаемых радиологических последствий при обрушении. Однако, предсказания имеющихся моделей основываются на *максимально* консервативных предположениях. В принципе, такой подход оправдан при значительных неопределенностях в исходных данных. Однако, в сложившихся условиях, излишний консерватизм может повлечь далеко идущие последствия – слишком велико ожидаемое облучение персонала при реализации противоаварийных мероприятий.

В настоящей работе сделана попытка максимально реалистической оценки «функции источника» для объекта «Укрытие» и радиологических последствий при наиболее вероятном сценарии обрушения кровельных конструкций.

2. Сценарии обрушения строительных конструкций

2.1. Наиболее уязвимые строительные конструкции [2]

2.1.1. Западная зона

- Несущая способность стены по оси 50 с прилегающим к ней каркасом (оси 49 и 51') не обеспечена при минимальных расчетных воздействиях при сейсмической нагрузке в направлении «восток-запад» (4.3 балла по шкале MSK-64);
- Покрытие между контрфорсной стеной и стеной по оси 50 (горизонтальные щиты и Г-образные западные «клюшки») не устойчиво при нагрузке от торнадо (1.6 кН/м^2);
- Западная контрфорсная стена неустойчива при нагрузке от торнадо (1 кН/м^2).

2.1.2. Южная зона

- Южные клюшки могут сойти с опор на балке «Мамонт» при торнадо (1.5 кН/м^2);
- Сейсмические воздействия порядка 4.5 балла являются опасными для поврежденных колонн деаэрационной этажерки по ряду Б. При сейсмическом воздействии «север-юг» разрушение верхнего яруса деаэрационной этажерки может привести к разрушению балки «Осьминог» и падению южных «клюшек».

2.1.3. Разделительная стена между ОУ и блоком «В»

- Не устойчива при сейсмическом воздействии свыше 5 баллов.

2.1.4. Северная зона

- Северные клюшки могут быть опрокинуты при торнадо (80-85 кг/м²)

Перечень наиболее уязвимых участков ОУ и постулируемые исходные события (ПИС), приводящие к разрушениям, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Наиболее уязвимые конструкции ОУ и вероятности ПИС с минимальной интенсивностью, приводящей к разрушениям.

Зона ОУ	ПИС	Вероятность, год ⁻¹
Западная стена в осях 49-51 ¹	Землетрясение 4.3 балла (MSK-64), направление воздействия «восток-запад»	0.018
Деаэрационная этажерка	Землетрясение 4.5 балла (MSK-64), направление воздействия «север-юг»	0.01
Контрафорсная стена	Торнадо, создающее давление свыше 10 ³ Н/м ²	< 10 ⁻⁵
Покрытие между контрафорсной стеной и стеной по оси 50	Торнадо, создающее давление свыше 1.6*10 ³ Н/м ²	< 10 ⁻⁵
Разделительная стена в координатах 38-41;Г-Т	Сейсмическое воздействие свыше 5 баллов (MSK-64)	< 0.01
Северные «клюшки»	Торнадо, создающее давление свыше 800 Н/м ²	< 10 ⁻⁴
Южная вентиляционная шахта может быть разрушена после проведения стабилизационных мероприятий при комбинированном воздействии сейсмике и снеговой нагрузки	???	???

Таким образом, детального (на данном этапе) рассмотрения заслуживают сейсмические воздействия в направлении «запад-восток» и «север-юг», которые приводят к разрушениям, соответственно, западной стеной ОУ по оси 50 и балки «Осьминог» по ряду Б.

2.2. Сценарии разрушения кровельных конструкций ОУ

Для дальнейших рассуждений примем, что:

- Вероятность обрушения строительных конструкций по деградиационным причинам стала пренебрежимо малой после укрепления опор балок Б1-Б2 в узлах 50/Ж и 50/П;
- Единственным иницирующими событиями, имеющими значимые вероятности для обрушения ОУ являются землетрясения:
 - с интенсивностью 4.3 балла и направлением воздействия «запад-восток» (вероятность такого события оценивается < 0.018 год⁻¹);
 - с интенсивностью 4.5 балла и направлением воздействия «север-юг» (вероятность такого события оценивается < 0.01 год⁻¹).

При определении интенсивностей землетрясений в Таблице 1 направление воздействия не учитывалось, и, следовательно, дополнительный учет направления сейсмического воздействия приведет к снижению его вероятности. Сеймотектоническую обстановку района ЧАЭС определяет узел сопряжения

Тетеревского и Южно-Припятского разломов, расположенный в 6...10 км к северо-востоку [3]. Таким образом, ожидаемое направление по крайней мере первого (наиболее сильного) толчка – юго-западное.

Предполагаемые последствия таких сейсмических воздействий следующие.

При разрушении западной стены по оси 50:

- Обрушится верхняя часть (до отм. 12) западной стены прилегающим каркасом (оси 49-51'). Обрушится опирающееся на нее западное покрытие между контрафорсной стеной и стеной по оси 50 (горизонтальные щиты и Г-образные западные “клюшки”). Сойдут с опор западные концы блоков балок Б1-Б2. Западная контрафорсная стена выдерживает воздействие;
- Южные щиты и северные “клюшки” сходят с опор;
- Плоское падение блока балок Б2 на поверхности бывшего Центрального Зала не предполагается, восточные оконечности блоков балок Б1 и Б2 сохраняют свое положение на вентшахтах. Падение отдельных труб покрытия крайне маловероятно, так как трубы “склеены” между собой в зазорах гидроизолирующим слоем по всей длине.
- Элементы конструкций, прилегающих к западной стене в осях 49-51¹ а также элементы покрытия между контрафорсной стеной и стеной ОУ по оси 50 образуют “завал” в зазоре между ОУ и контрафорсной стеной. Контрафорсная стена выдерживает воздействие.
- Южные “клюшки”, опирающиеся на балки “Мамонт” и “Осьминог” сохраняют свое положение.

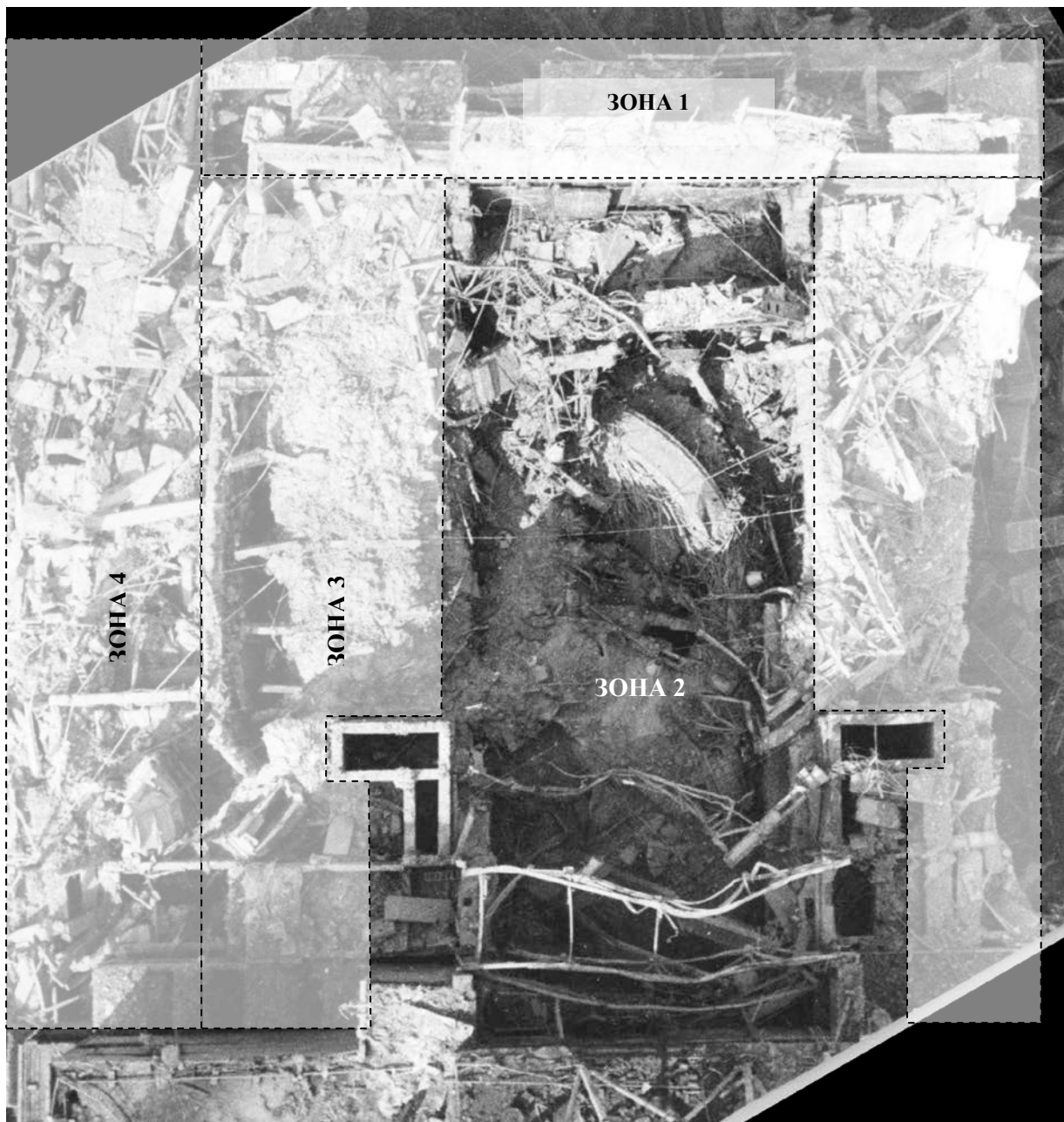
Зонами потенциального пылеобразования являются зоны 1, 2, 3 на Рис. 1.

При сейсмическом воздействии “север-юг” возможно разрушение балки “Осьминог” и падение южных “клюшек” на развалы деаэрационной этажерки. Следует отметить, что в расчетах игнорировалось наличие подпоров для наклоненных колонн деаэрационной этажерки на отм. 38.6 со стороны нового покрытия машзала. Существующее усиление считалось не эффективным, что, по нашему мнению, является слишком консервативным предположением. Зоной потенциального пылеобразования является зона 4 на Рис. 1.

О характере поверхностей ОУ, являющихся зонами потенциального пылеобразования, можно судить по Рис. 2-7.

В качестве возможных механизмов пылеподъема (см. Главу 3) будут рассматриваться сдвиг пыли воздушными потоками, вытесняемыми падающими конструкциями, и подъем пыли вследствие вибрации поверхностей. Сдвиг пыли существенен для плоского падения массивных конструкций типа щитов и “клюшек” покрытия.

В любом случае, радиологические последствия разрушения балки “Осьминог” существенно меньше, чем разрушение западной стены ОУ. Действительно, при опрокидывании клюшек на крышу машзала пылеподъем не существенен, а при падении на развалы деаэрационной этажерки сдвиг пыли будет ослаблен преградой в виде разрушенных помещений южных барабан-сеператоров (см. Рис. 7). Далее будет рассмотрен только сценарий, связанный с разрушением западной стены.



*Рис. 1 Зоны потенциального пылеобразования при обрушении кровельных конструкций ОУ:
ЗОНА 1 – обрушение западной стены;
ЗОНА 2 – вибрация поверхности;
ЗОНА 3 – сдув пыли из под падающих щитов и клюшек с опор
ЗОНА 4 – падение южных клюшек.*

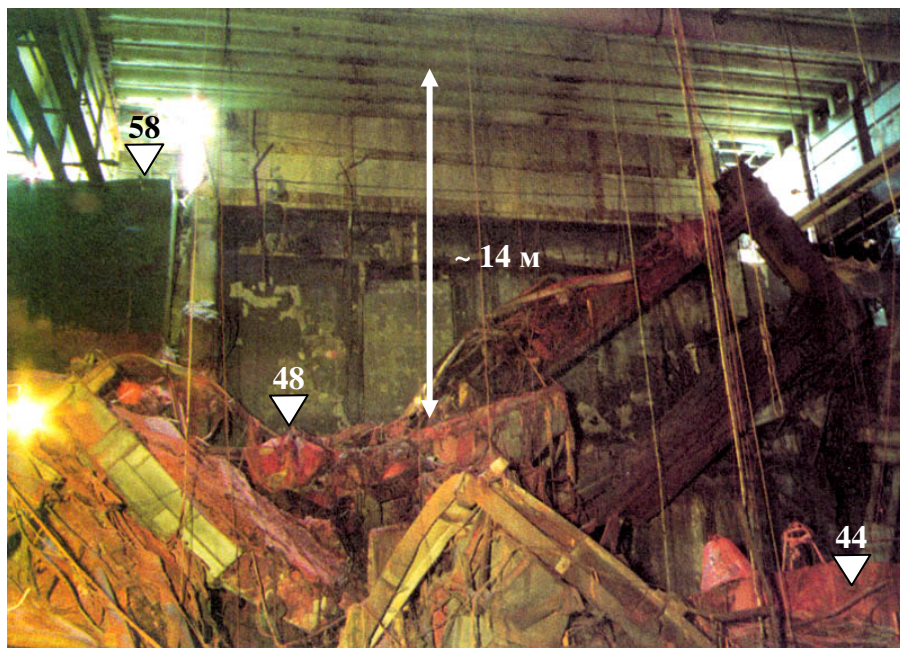


Рис. 2 Западная часть бывшего Центрального зала 4-го энергоблока

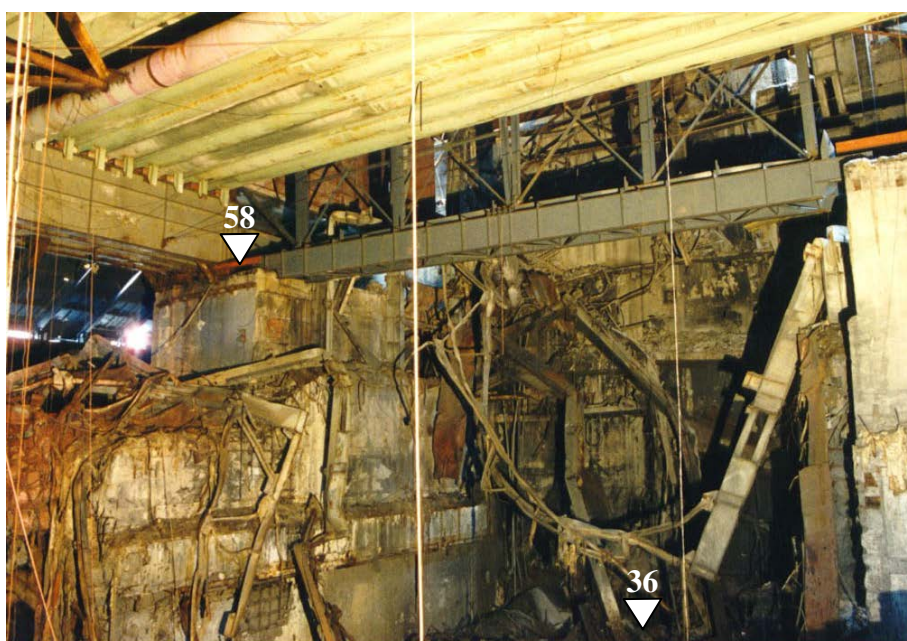


Рис. 3 Восточная часть бывшего Центрального Зала 4-го энергоблока



Рис. 4 Зона пылеобразования при обрушении западной стены

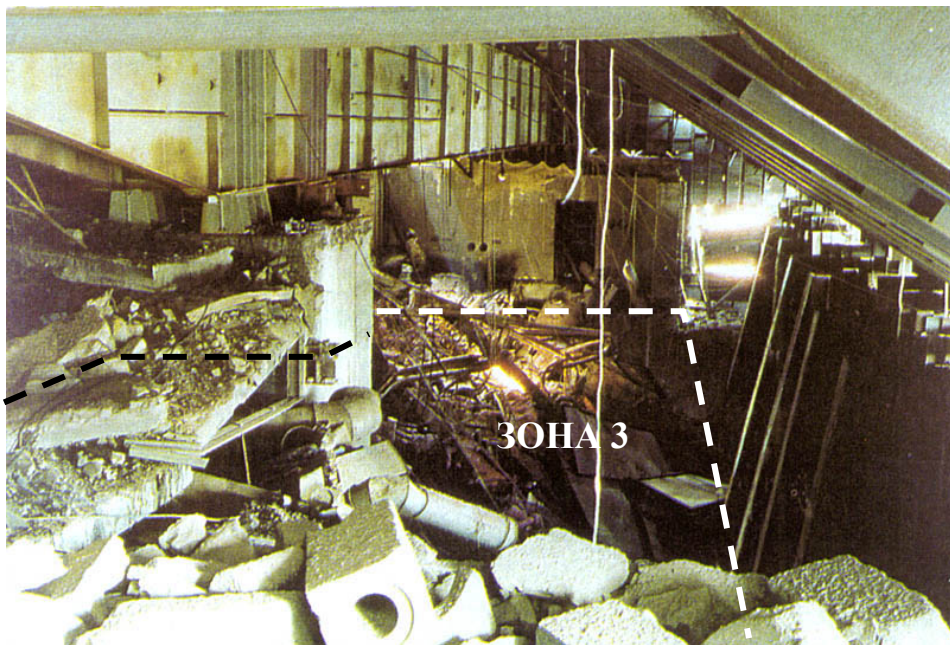


Рис. 5 Зона пылеобразования при падении северных «клюшек»

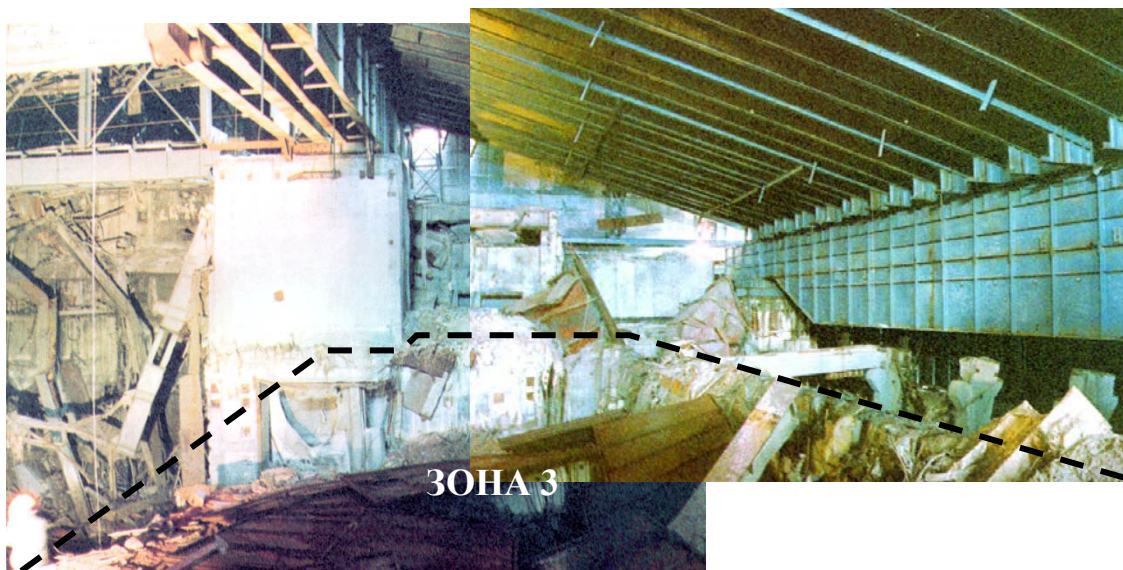


Рис. 6 Зона пылеобразования при падении южных щитов



Рис. 7 Зона падения южных "клюшек" после разрушения балки "Осьминог"

3. Вынос пылевого облака за пределы объекта

В качестве исходных данных по запасам пыли, способной ко вторичному подъему будем использовать результаты работы [4], которые сводятся к следующим положениям:

- Падение всей массы кровельных конструкций объекта «Укрытие» приводит к колебаниям поверхности «развалов» с максимальным значением ускорения примерно 75 м/с^2 . Однако, условие преодоления частицами ламинарного пограничного слоя существенно ограничивает пылеподъем по механизму «подскока» частиц. Преодолеть пограничный слой способны лишь частицы с аэродинамическими диаметрами свыше 300 мкм, которые практически сразу же выбывают из облака и осаждаются.
- Основным механизмом пылеподъема является «сдув» частиц с загрязненных поверхностей. При данном механизме грубодисперсная фракция частиц поднимается легче, чем мелкодисперсная и спектр размеров поднятых частиц отличается от спектра размеров частиц на поверхности.
- Эффект «старения» загрязнения приводит к более прочной фиксации частиц на поверхности с течением времени. Если для «свежего» загрязнения процент сдува пыли воздушными потоками несколько десятков метров в секунду составляет около 60%, то для «старого» загрязнения в условиях ОУ он не более 40%.
- Основной пылеподъем при обрушении кровельных конструкций ОУ происходит при плоском падении щитов северного и южного покрытий объекта «Укрытие» на крыши бывших северного и южного барабан-сепараторов. Пылеподъем при обрушении западного участка оценить трудно, однако из качественных соображений он не превышает пылеподъема при плоском падении кровельных конструкций. Пылеподъем за счет вибрации поверхностей после удара и «сдув» частиц с центральных областей «развала» в расчетах не учитывался, как несущественный. Он компенсируется консервативным характером рассмотрения пылеподъема по первому механизму.
- Реалистичные (с сохранением неизбежной степени консерватизма) оценки массы поднятой при падении кровельных конструкций пыли составляют:

Общая масса инертной пыли.....	3.5 тонны
Общая масса «топливной» пыли.....	8 кг(U)
Масса ингаляционной фракции «топливной» пыли.....	3 кг(U)

3.1. Образование пылевого облака после обрушения

Величина кинетической энергии газа, вовлекаемого в область разряжения за падающими конструкциями, E_1 , по порядку величины равна работе против силы сопротивления воздуха падающим конструкциям:

$$E_1 \approx \int_0^H dy \alpha R^2 \rho v^2 \quad (1)$$

где $v(y) = (2gy)^{1/2}$ – скорость падающих конструкций на высоте $H-y$, ρ – плотность воздуха (1.29 кг/м^3), α – коэффициент лобового сопротивления. Значение α , пригодное для практических расчетов, порядка 1. Таким образом $E_1 \approx \rho g R^2 H^2$.

Объем газа, V , вовлекаемый в движение при прохождении телом основного участка траектории составляет [5]:

$$V \approx R^{4/3} H^{5/3} = 3.4e3 \text{ м}^3 \quad (2)$$

Отсюда не трудно получить оценку для средней скорости воздушных потоков в турбулентном следе в месте падения конструкций:

$$\rho v^2 V \approx E_1$$

$$v \approx \sqrt{gR^{2/3}H^{1/3}} \quad (3)$$

В нашем случае $H \approx 11$ м, $R \approx 10$ м и $v \approx 10$ м/с. Данное значение скорости является достаточным, чтобы «перемешать» поднятые частицы в турбулентном следе, образуемом за падающими конструкциями.

Сохранившиеся стены ОУ, и массивные упавшие конструкции типа блока балок Б2, нагромождение «кляшек», щитов и труб будут препятствовать быстрому распространению облака и оно, по видимому, быстро «термализуется», т.е. скорости воздушных потоков и пылевых частиц станут равными скоростям воздуха в стабильном состоянии ОУ.

Для дальнейших оценок примем, что объем пылевого облака будет соответствовать фигуре, изображенной на Рис. 8 – мы предполагаем, что пыль поднимется над зонами пылеобразования на высоту 11 м. Объем пространства, изображенного на Рис. 8, составляет примерно $5.5 \cdot 10^4$ м³. Учитывая, что предполагаемая масса поднятой пыли составляет 3.5 тонны, массовая концентрация пыли в облаке составит $3.5 \cdot 10^6 / 5.5 \cdot 10^4 \approx 64$ г/м³.

Дальнейшая судьба облака будет определяться его гравитационным осаждением и выносом за пределы объекта за счет естественной вентиляции подкровельного пространства.

3.2. Осаждение пыли из облака

При ожидаемой концентрации пыли в облаке – 64 г/м³ движение частиц нельзя рассматривать как независимое, и ожидается быстрое осаждение пыли. По результатам работы [6], при рассыпании порошка УО₂ концентрация пыли 10 г/м³ существовала всего несколько секунд и через примерно 200 с достигла концентрации 10 мг/см³, которая держалась несколько часов. Из графика уменьшения массовой концентрации пыли со временем в той же работе можно оценить, что постоянная времени, характеризующая осаждение пыли, составляет 0.09-0.04 с⁻¹. Для дальнейших оценок будем предполагать минимальную постоянную осаждения пыли – 0.04 с⁻¹.

3.3. Вынос пыли за счет естественной вентиляции

Общий подход и количественные параметры для оценки вентилируемости подкровельного пространства ОУ описаны в работе [7]. Вентиляция объекта «Укрытие» обусловлена перепадом давления внутри и снаружи здания. Перепад давления может быть вызван двумя компонентами – ветровым напором и разностью температур внутри и снаружи здания. Первая компонента может быть оценена по формуле:

$$\Delta P_0 = C_d(\rho u^2/2) \quad (4)$$

где $C_d \approx 0.2$ – коэффициент формы здания ОУ, u – скорость ветра, ρ – плотность воздуха ≈ 1.23 кг/м³. При среднем значении скорости ветра на промплощадке ЧАЭС $u \approx 4$ м/с, $\Delta P_0 \approx 2$ Па.

Вторая компонента перепада давления вызвана перепадом температур внутри и снаружи здания T_0 и T_i , и может быть определена по формуле [7]

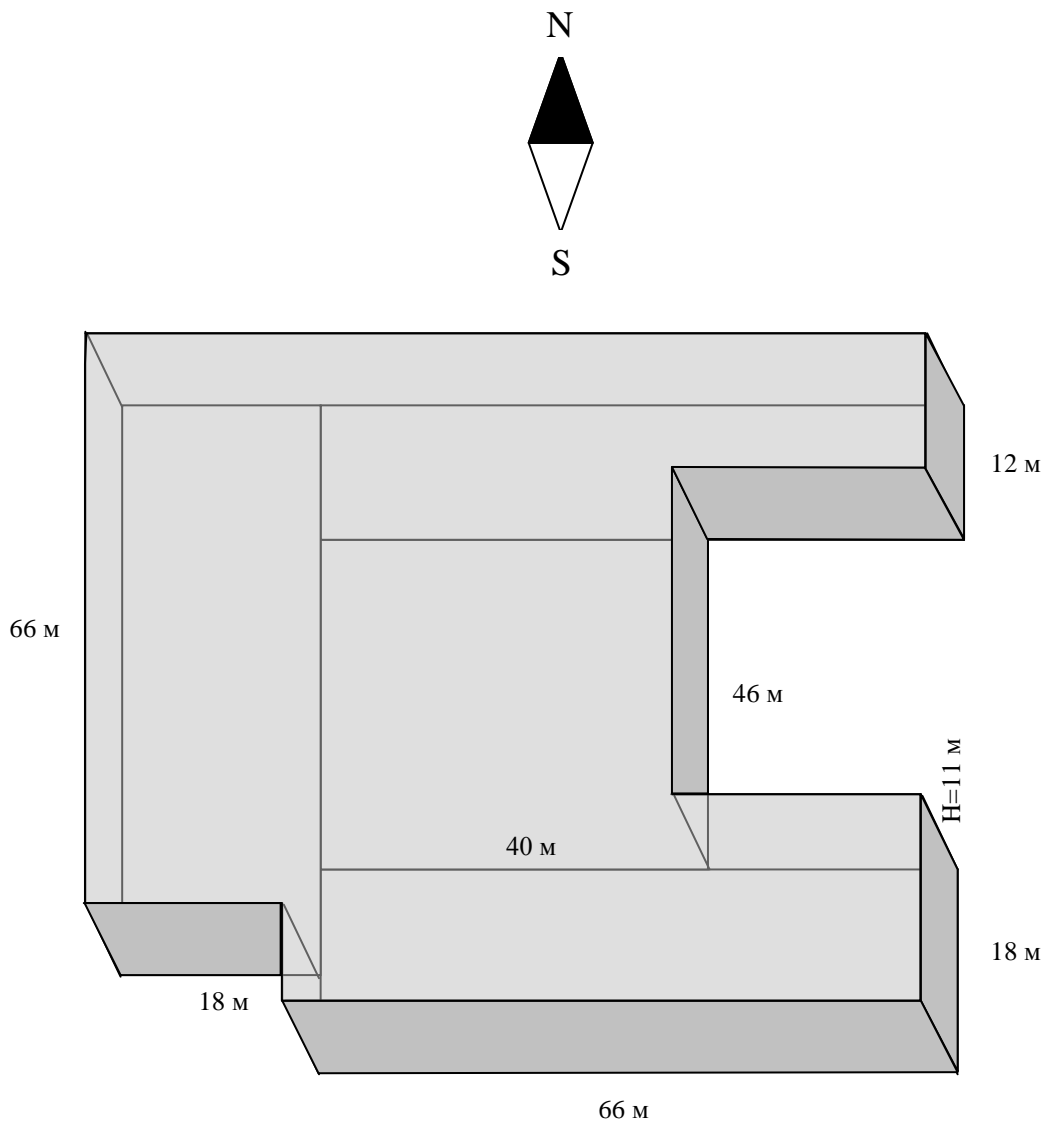


Рис. 8 Объем поднятой пыли при обрушении кровельных конструкций ($V \approx 5.5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$).

$$\Delta P(z) \approx \alpha \left| \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_o} \right| (z - z_0) \quad (5)$$

где $\alpha = 3454 \text{ Па} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}$, $z - z_0$ – высота вентилируемого пространства. Будем предполагать, что вентиляция подкровельного пространства происходит с отметки 42, соответствующей поверхности «развалов» на крыше деаэрационной этажерки, до верхних отметок конструкций, ограничивающих «развал» после обрушения. Таковыми будут являться:

- контрафорсная стена на западе, верхняя отметка $\approx 52 \text{ м}$;
- контрафорсы на севере, верхняя отметка $\approx 55 \text{ м}$;
- южные клюшки на юге, верхняя отметка $\approx 58 \text{ м}$;
- блок «В» на востоке, верхняя отметка $\approx 71 \text{ м}$.

В качестве средней отметки примем 59 м, и, следовательно, $z - z_0 \approx 17 \text{ м}$.

Для ОУ наблюдается регулярный перегрев воздуха в подкровельном пространстве по сравнению с окружающим воздухом. По результатам работы [7] примем перегрев воздуха в подкровельном пространстве 1°K . Средний перегрев воздуха составляет около 2° и максимален в зимние месяцы, однако при усреднении брались только положительные температуры, так как в зимние месяцы поверхности «развалов» замерзают.

Отсюда разность давлений $\Delta P(z) \approx 0.8 \text{ Па}$.

Постоянная воздухообмена λ может быть рассчитана по формуле [7]:

$$\lambda = \frac{E}{V} (\Delta P)^{0.5} \quad (6)$$

где E – коэффициент проницаемости оболочки здания (с размерностью $L^{3+n}T^{2n-1}M^{-n}$), V – внутренний объем здания. E равно произведению $A_0(2/\rho)^{0.5}$, где A_0 – эффективная площадь щелей в оболочке. В рассматриваемом случае в качестве A_0 можно рассматривать площадь открывшейся после обрушения поверхности, которая в соответствии с Рис. 8 составляет примерно 5000 м^2 , $V \approx 5000 \cdot 11 = 5.5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$, $\Delta P = 2.8 \text{ Па}$, и, следовательно, $\lambda \approx 0.19 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, из «открытого» подкровельного пространства за счет естественной вентиляции будут выноситься $5.5 \cdot 10^4 \cdot 0.19 \approx 10400$ кубических метров воздуха в секунду, скорость восходящих воздушных потоков на уровне верхних отметок сохранившихся конструкций – $(14300 \text{ м}^3/\text{с})/(5000 \text{ м}^2) \approx 2 \text{ м/с}$.

3.4. Зависимость пылевого выброса от времени года

Отметим, что снова предполагаются максимальная вентилируемость и пылевой вынос из подкровельного пространства. Действительно, исходя из зависимостей температуры внутри и снаружи ОУ, в период декабрь-февраль (3 месяца в году) температура на поверхности «развалов» отрицательна, и пылевой вынос при обрушении минимален вследствие «приморзания» пыли к поверхности. В период март-июль (5 месяцев в году) за счет тепловой инерции объекта температура подкровельного пространства равна или меньше температуры окружающего воздуха, и вентилируемость подкровельного пространства минимальна (не исключено, что будет происходить, наоборот, «всасывание» воздуха в объект).

Таким образом, наиболее «опасными» месяцами с точки зрения пылевого выноса при обрушении являются август-октябрь. Данный период составляет всего 3 месяца из 12, что, по-видимому, следует учесть при определении вероятностей постулируемых исходных событий (ПИС), ведущим к разрушениям объекта.

3.5. Вынос за пределы ОУ

Сразу после формирования пылевого облака в подкровельном пространстве расход пыли будет определяться осаждением (на разрушенные конструкции) с постоянной времени $\lambda_1 = 0.04 \text{ с}^{-1}$ и выносом за пределы здания ОУ за счет естественной вентиляции с постоянной времени $\lambda_2 = 0.19 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, примерно $\lambda_1/\lambda_2 \approx 20\%$ пыли осядет в пределах «Укрытия», а характерное время выхода пыли за пределы подкровельного пространства – $1/(\lambda_1 + \lambda_2) \approx 4 \text{ с}$. Отметим, что используется минимальная постоянная времени осаждения пыли – 0.04 с^{-1} , при использовании в модели более реалистичного значения – 0.09 с^{-1} , процент осажженной пыли увеличится.

3.6. Оценка высоты подъема пылевого облака

3.6.1. Кинематический расчет

Простое аналитическое описание вертикального движения облака пыли возможно на основе гипотезы о процессе «подсасывания» [8]. Пусть в начальный момент облако имело размер b_0 и скорость всплывания u_0 . В соответствии с моделью [8]

$$\frac{db^3}{dt} = 3\beta b^2 u \quad (7)$$

где β – коэффициент подсасывания, значение которого для движущихся турбулентных областей составляет примерно 0.2. Отсюда $b = b_0 + \beta u$, т.е. размер облака должен расти с ростом его вертикальной координаты y . Уравнение движение облака (пренебрегая эффектом выбывания частиц за счет сорбции окружающими конструкциями и гравитационного осаждения наиболее крупных частиц) имеет вид

$$\frac{d}{dt}(\rho_c b^3 u) = -g(\rho_c - \rho)b^3 \quad (8)$$

где $\rho_c(t)$ – плотность пылевого облака, ρ – плотность воздуха (1.29 кг/м^3). Если начальная плотность дисперсной фазы в облаке равна ρ_p , то $\rho_c = \rho + \rho_p(b_0^3/b)$. Отсюда легко получить, что

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_c u b^3) &= -\rho_p g b_0^3 = \text{const} \quad \text{и} \\ \frac{dy}{dt} = u(t) &= \frac{b_0^3}{b^3} \left(u_0 - \frac{\rho_p}{\rho_c} g t \right) \quad (9) \end{aligned}$$

u_0 – начальная скорость «всплывания» пылевого облака. Полученное уравнение описывает движение по траектории, имеющей точку возврата. Интерпретация такого движения очевидна, и связана с тем, что пока частицы находятся в облаке, его плотность будет больше плотности воздуха, что в конце концов должно привести к обратному движению облака вниз.

Максимальная высота подъема облака определяется из условия $u = 0$, и, следовательно,

$$t_{\max} \approx \frac{\rho_c u_0}{\rho_p g} \quad \text{и} \quad y_{\max} \approx \frac{\rho_c u_0^2}{2\rho_p g} \quad (10)$$

В наших предположениях $\rho_c = \rho + \rho_p = 1.29 + 0.064 = 1.354 \text{ кг/м}^3$. По порядку величины u_0 равна средней пульсационной скорости воздушных потоков в турбулентном следе, образовавшемся за падающим конструкциями $\sim 10 \text{ м/с}$ (см. формулу 3.3) Отсюда $y_{\max} \approx 108 \text{ м}$ $t_{\max} \approx 22 \text{ с}$.

Заметим, что полученная оценка занижена, так как не учитывает подъем облака за счет положительной силы плавучести вследствие его перегрева.

3.6.2. Расчет высоты подъема облака по эмпирическим формулам

В литературе имеется множество подходов для определения максимальной высоты выброса u_{\max} . В работах [9,10] для нейтральных погодных условий предельный подъем струи

$$y_{\max} = 3 \frac{w_0 d}{u} \left(2.5 + 3.3 g \frac{d \Delta T}{2 u^2 T_s} \right) \quad (11)$$

здесь w_0 – скорость истечения выброса из трубы (~ 2 м/с), d – диаметр устья трубы, u – скорость ветра (~ 4 м/с) g – ускорение свободного падения, 9.81 м/с² ΔT – перегрев выходящего воздуха по отношению к атмосферному ($\sim 1^{\circ}\text{K}$), T_s – температура атмосферного воздуха ($\sim 273^{\circ}\text{K}$). Величину d можно оценить из соотношения

$$V_1 = \frac{\pi d^2}{4} w_0$$

где V_1 – расход воздуха через подкровельное пространство (~ 10400 м³/с). Отсюда $d \sim 81$ м. Первое слагаемое описывает динамический подъем облака за счет напора выброса, второе – плавучий подъем вследствие перегрева выбрасываемого воздуха. В наших предположениях $y_{\max} \sim 304 + 36$ м, то есть температурный подъем существенно меньше динамического.

В работах [11-13] рекомендованы следующие формулы:

- для нейтральных условий

$$y_{\max} = 3 \frac{d w_0}{2 u} + 400 \frac{\Phi}{u^3} \quad (12)$$

- для устойчивых условий при ветренной погоде

$$y_{\max} = 1.5 s^{-1.6} \left(\frac{w_0 d}{2 \sqrt{u}} \right)^{2/3} + 2.6 \left(\frac{\Phi}{u s} \right)^{1/3} \quad (13)$$

- для устойчивых условий при штиле

$$y_{\max} = 5.1 \Phi^{1/4} s^{3/8} \quad (14)$$

Здесь $\Phi = \left(\frac{\Delta T}{T_s} \right) \frac{g w_0 d^2}{4}$ (~ 118) – величина, пропорциональная силам плавучести [м⁴/с³], s – параметр устойчивости атмосферы ($\sim 1 \cdot 10^{-3}$).

Расчет по приведенным формулам дает большой разброс величин – от нескольких единиц до нескольких сот метров. Однако, для “средних” погодных условий можно предполагать подъем облака на высоту не менее 100 м.

4. Расчет концентрации примеси в приземном слое воздуха при обрушении кровельных конструкций ОУ

4.1. Расчет по методике ОНД-86

Расчет распределения концентрации примеси в приземном слое воздуха проводился по рекомендациям ОНД-86 («Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий», Гидрометеиздат, Ленинград – 1987). Выбор данной методики обусловлен тем, что она позволяет рассчитывать именно *максимальные* концентрации (для всех погодных условий при данном источнике) и, по мнению авторов, в ней проводится наиболее корректный учет эффектов образования ветровых теней, что существенно для ОУ, являющегося «низким» источником. Применимость данной методики к расчетам распространения выбросов из ОУ изучалась в работе [14]. Для условий текущего технического обслуживания ОУ предсказания модели отличаются от экспериментальных результатов не более, чем на 20%.

В расчетах использовались следующие предположения.

Выброс происходит из круглого устья с эффективным диаметром $d = 81$ м;

Высота выброса над поверхностью земли – 50 м;

Расход воздуха через устье источника – $10400 \text{ м}^3/\text{с}$;

Скорость восходящих воздушных потоков в устье источника – 2 м/с;

95% квантиль массового распределения аэрозолей по диаметрам составляет 150 мкм;

Размеры объекта и расчеты областей аэродинамической тени ОУ брались из [1] для наиболее “компактной” области тени при направлении ветра Север-Юг.

При данных предположениях максимальная концентрация примеси в приземном слое воздуха c_M [мг/м³] может быть рассчитана по формуле

$$c_M = 4.2 \cdot 10^{-4} \cdot M \quad (15)$$

где M – масса вещества, выбрасываемого в единицу времени [г/с]. Максимальная концентрация достигается при “опасной” скорости ветра $u_M \approx 9.3$ м/с (имеется в виду скорость ветра на высоте флюгера - 10 м) на расстоянии $x_M \approx 1868$ м от ОУ.

Интересно отметить, что при аварийном выбросе из «Укрытия» пыль распространяется гораздо дальше, чем в условиях текущего технического обслуживания. Так, по результатам [14], где подробно рассматривается модель распространения примеси в текущих условиях технического обслуживания ОУ, $c_M = 1.13 \cdot 10^{-2} \cdot M$ и $x_M \approx 200$ м (т.е. максимальная концентрация на единицу выброса примеси почти в 30 раз больше, а расстояние, на котором происходит достижение максимальной концентрации, соответствует границе аэродинамической тени). При аварийном выбросе, за счет «раскрытия» объекта после падения кровельных конструкций, существенно возрастают диаметр «устья трубы» в модели – т.е. площадь, с которой происходит выброс, и расход воздуха через подкровельное пространство за счет увеличения интенсивности воздухообмена. Данный эффект приводит к существенному увеличению высоты выброса в модели, и, следовательно, влияние аэродинамической тени здания становится менее существенным.

4.2. Расчет максимальных концентраций аэрозоля при аварийном выбросе

Стандартный подход при переходе от стационарного источника к мгновенному состоит в том, что вместо концентрации, c , рассматривается так называемый временной интеграл концентрации, или экспозиция:

$$\psi = \int_{x/\bar{u}}^{\infty} c(x - \bar{u}t, y, o) dt \quad (16)$$

где x – координата по ветру, \bar{u} – средняя скорость ветра. В случае гауссовой модели распространения примеси, внешний вид формул для расчета c и Ψ одинаков, и методы вычисления концентраций можно использовать для расчета экспозиций. В дальнейших оценках также предполагается, что внешний вид формул для концентрации примеси и интеграла концентраций одинаков.

Отсюда с учетом (15) и результатов [4], интегралы концентраций составят:

- для ингаляционной фракции топливной пыли (3 кг в выбросе) - $\Psi_M^{inhal} = 4.2 \cdot 10^{-4} \cdot 3000 \approx 1.3 [\text{мг} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}]$;
- для всей топливной пыли (8 кг в выбросе) $\Psi_M^{total} = 4.2 \cdot 10^{-4} \cdot 8000 \approx 3.4 [\text{мг} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}]$

Полученная в наиболее опасной точке за бесконечное время экспозиция ингаляционной фракции топливной пыли составит в единицах $[\text{г} \cdot \text{мин} \cdot \text{литр}^{-1}]$

$$1.3 \cdot 10^{-3} [\text{г}/\text{мг}] / 60 [\text{с}/\text{мин}] / 1000 [\text{л}/\text{м}^3] \approx 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ г(топлива)} \cdot \text{мин}/\text{л}.$$

Предполагая скорость дыхания персонала равной 20 л/мин, получим, что при достаточно долгом пребывании в пределах опасной зоны человек без средств защиты органов дыхания может «вдохнуть» $4.4 \cdot 10^{-7}$ г «топливной» пыли.

Распределение поля концентраций аэрозоля при аварийном выбросе из ОУ приведено на Рис. 9. Распределение приведено в относительных единицах, условная концентрация «1» соответствует ингаляции $4.4 \cdot 10^{-7}$ г «топливной» пыли за достаточно длительное пребывание в зоне выброса без средств индивидуальной защиты органов дыхания.

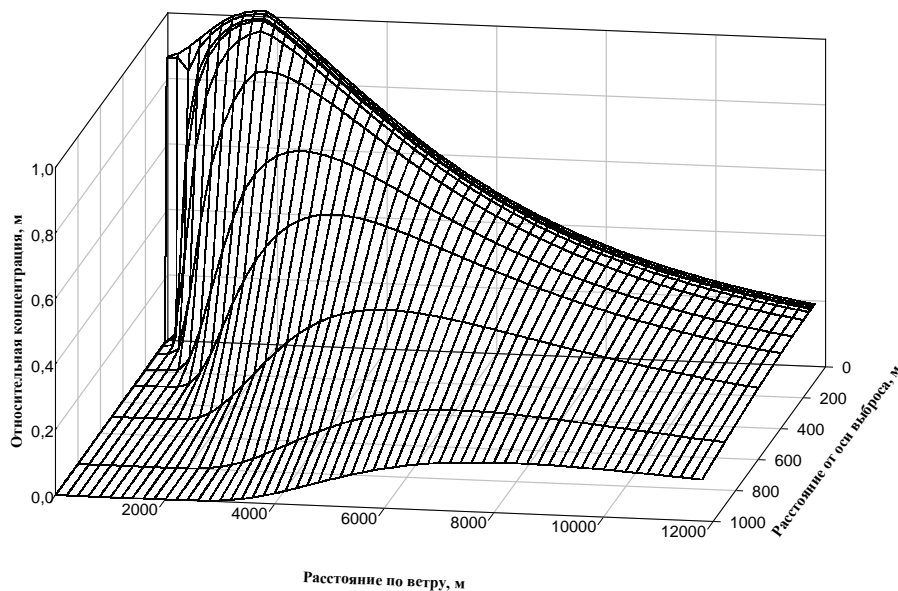


Рис. 9 Распределение концентрации аэрозоля в приземном слое воздуха при обрушении кровельных конструкций ОУ

На Рис. 10 приведено распределение поля концентраций в непосредственной близости от объекта, область аэродинамической тени показана в виде заштрихованного участка. Размер тени примерно 50x250 м, поле концентраций примерно одинаково на всей площади и соответствует 0.85 от максимального значения (ингаляция $0.85 \cdot 4.4 \cdot 10^{-7} \approx 3.7 \cdot 10^{-7}$ г «топливной» пыли.

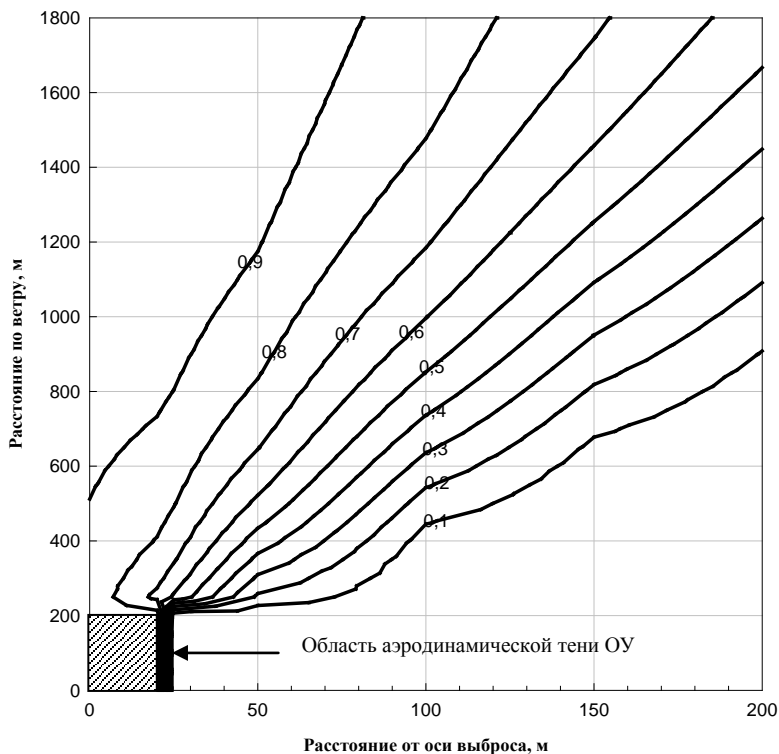


Рис. 10 Поле концентраций аэрозоля при обрушении кровельных конструкций в непосредственной близости от ОУ

4.2. Осаждение примеси на грунт

Значения интеграла концентраций позволяют легко оценить плотность выпадений на грунт при известной скорости осаждения примеси. По результатам [14] средняя скорость сухого осаждения аэрозолей для условий объекта «Укрытие» составляет примерно 2.5 см/с, и, следовательно, предполагая общую массу топливной пыли в выбросе 8000 г, максимальная плотность выпадений топливной пыли после прохождения облака составит

$$0.025 \text{ [м/с]} \Psi_M^{total} = 0.025 \cdot 4.2 \cdot 10^{-4} \cdot 8000 \approx 8.4 \cdot 10^{-5} \text{ [г*м}^{-2}\text{]}$$

5. Динамическая модель выброса

5.1. Формирование и характеристика аэродинамической тени здания объекта «Укрытие»

Помещение здания в любой первичный поток вызовет изменение в полях скоростей и давлений. Новые поля будем называть аэродинамически искаженными, мерой искажения будет разность между характеристиками первичных и искаженных полей.

Вязкие сдвиги на периферии первоначально неподвижного слоя заставляют воздух в следе двигаться вниз по потоку и поэтому порождают обратный поток вдоль поверхности земли, с тем чтобы заместить воздух, ушедший с подветренной стороны здания. Развивается тороидальная циркуляция в передней части следа, разделяя его на два отдельных подрайона (Рис. 11). Воздух за пределами ветровой тени движется по потоку, а в замкнутой области тени циркулирует. Если бы не было диффузии, поперечной к линиям тока, загрязненные примеси, выброшенные в область тени, задерживались бы там и их концентрация все время возрастала. На практике даже при наличии диффузии концентрация достигает во многих случаях больших значений.

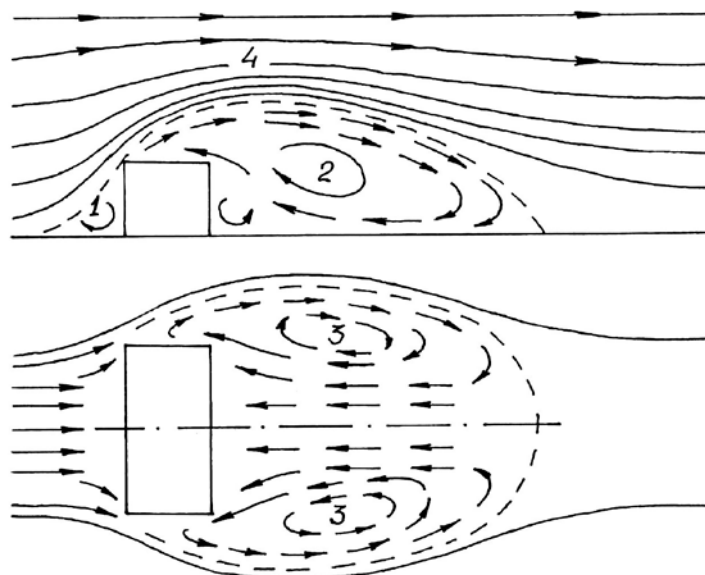


Рис. 11 Иллюстрация формирования области аэродинамической тени

Вблизи здания преобладает турбулентность, порожденная самим зданием. Отделенный слой воздушного потока (создающий циркуляцию в области ветровой тени) имеет большое количество завихрений, появившихся когда слой еще касался крыши здания. После отделения слой становится неустойчивым и распадается на завихренные части, содержащие отдельные вихри, которые растут при движении вниз. Более мелкие вихри переносят энергию поперек линий тока, сглаживая тем самым перепад скоростей. Периодически некоторые крупные вихри разрушаются, вызывая изменения границы следа. Очень большие вихри мигрируют вниз, в зону тени, вызывая сильные перемежающиеся порывы ветра. Далее, вниз по потоку, порожденная зданием турбулентность разрушается.

Из модельных экспериментов, проведенных в аэродинамических трубах, для области тени получены следующие характеристики [15]:

- средняя скорость в центре зоны тени составляет 60 % скорости первичного потока;
- граница зоны тени начинается на границах здания и развивается приблизительно в эллипсоид вращения с длиной, равной примерно трем характерным размерам здания и максимальным радиусом равным одной характерной длине;
- интенсивность поперечной турбулентности на границе следа составляет примерно 0.2. За границей тени она падает до нуля в первичном потоке;
- максимальная поперечная турбулентность наблюдается на высоте 0.33 радиуса по длине тени, минимальные значения поперечной турбулентности наблюдаются на оси и границе тени.

Размеры аэродинамической тени объекта «Укрытие» рассчитывались в работе [16]. Далее будут использованы параметры наиболее «компактной» аэродинамической тени, возникающей при направлении ветра Север-Юг.

Иллюстрация модели аэродинамической тени ОУ приведена на Рис. 12. Размеры тени взяты из работы [16]. Предполагается, что пылевой выброс полностью поступает в область аэродинамической тени, где происходит циркуляция (показанная на Рис. 12 штрих-пунктирной линией). Выбывание примеси происходит через боковую поверхность области аэродинамической тени (площадь $S \sim 7 \cdot 10^5 \text{ м}^2$) за счет поперечной составляющей скорости циркулирующих потоков. Поперечная составляющая скорости циркулирующих потоков при скорости ветра 9.3 м/с в наших предположениях равна $v_{\perp} = 9.3 \cdot 0.6 \cdot 0.2 \approx 1.1 \text{ м/с}$. Постоянная времени выбывания примеси из области тени при ее объеме $V \sim 6.8 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ равна $\lambda = S \cdot v_{\perp} / V \approx 1.13 \text{ с}^{-1}$.

5.2. Время существования примеси в области аэродинамической тени

Таким образом, будем рассматривать выброс из ОУ как перемещение примеси по различным «камерам», перемещение примеси по которым происходит с известными постоянными времени (Рис. 14). Отметим, что применение камерной модели предполагает так называемое «полное смешивание» примеси в соответствующей камере, т.е. перемешивание и достижение равномерной концентрации примеси должно происходить достаточно быстро. Очевидно, что в нашем случае это не совсем так – характерное время перемещения частиц по камерам – несколько секунд – сравнимо с соответствующими постоянными времени поступления и выведения из камер. Следовательно, реальные временные интервалы будут несколько больше получаемых в модели. Отметим, что получаемые результаты носят консервативный характер.

Далее рассмотрим следующую камерную модель (Рис. 13). Сформировавшееся в подкровельном пространстве пылевое облако (камера ОБЪЕКТ «УКРЫТИЕ») будет частично оседать обратно на поверхности «развала» (камера ОСАЖДЕНИЕ НА «РАЗВАЛ») с постоянной времени 0.04 с^{-1} и, частично, выноситься за пределы объекта в область аэродинамической тени (камера АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕНЬ) за счет естественной вентиляции с постоянной времени 0.19 с^{-1} (см. Главу 3). Из области тени примесь выносится за счет поперечной турбулентности циркулирующих воздушных потоков в окружающее пространство с постоянной времени 0.04 с^{-1} .

Камерная модель описывается системой линейных дифференциальных уравнений, решение которой проводилось численными методами. Анализ решений для камерной модели показывает, что как минимум 17% поднятой пыли оседут назад на поверхности «развала» (см. Главу 3, взята минимальная постоянная времени для оседания пыли из облака). Зависимость концентрации примеси от времени для области аэродинамической тени (камера № 3) приведена на Рис. 14. Видно, что время существования повышенных концентраций примеси в области тени составляет 10-20 секунд.

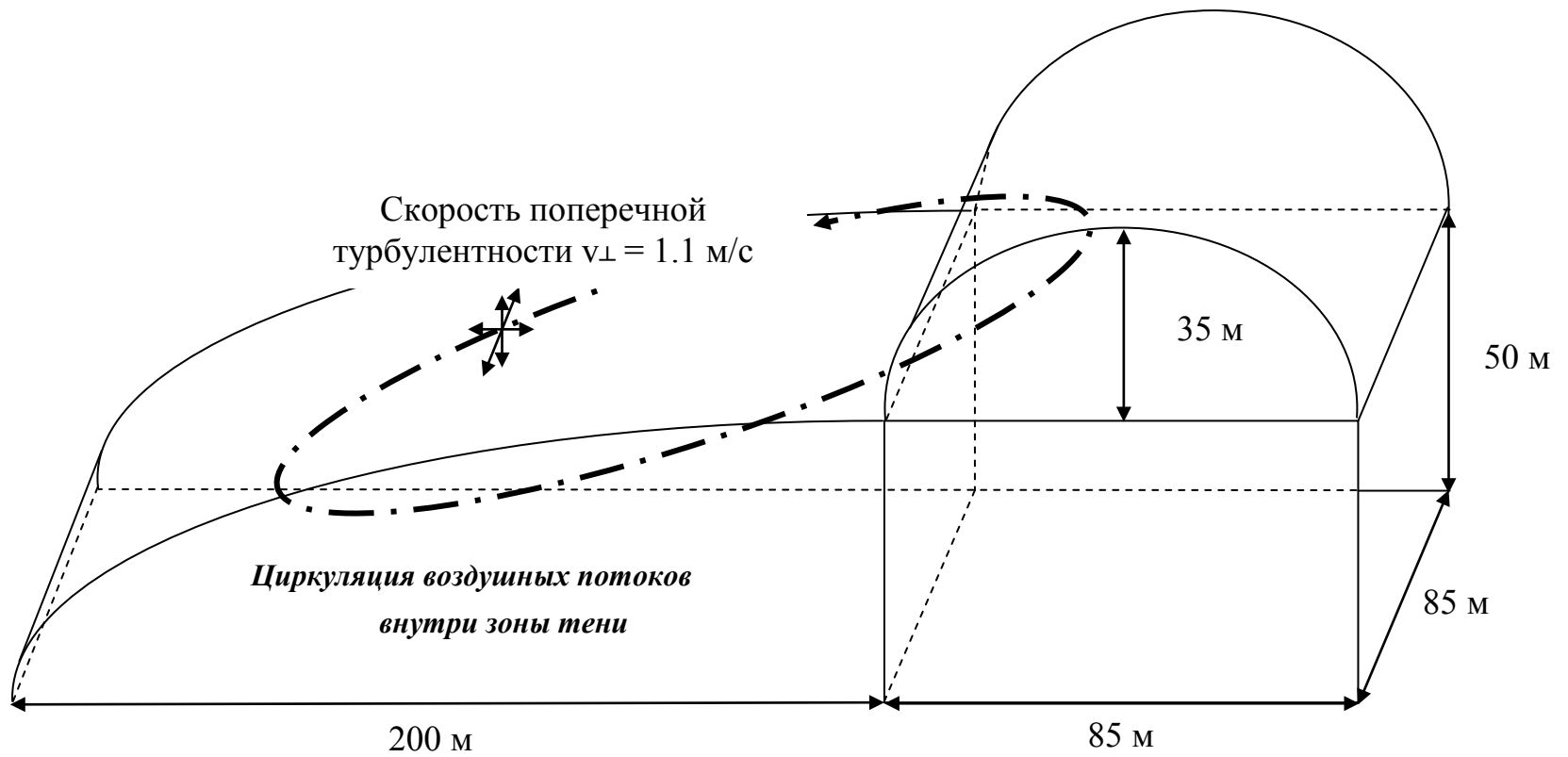


Рис. 12 Иллюстрация модели аэродинамической тени ОУ ($V \approx 6.8 \cdot 10^5 \text{ м}^3$; $S \approx 7 \cdot 10^4 \text{ м}^2$, $\lambda_{3d} \approx 1.13 \cdot 10^4$).

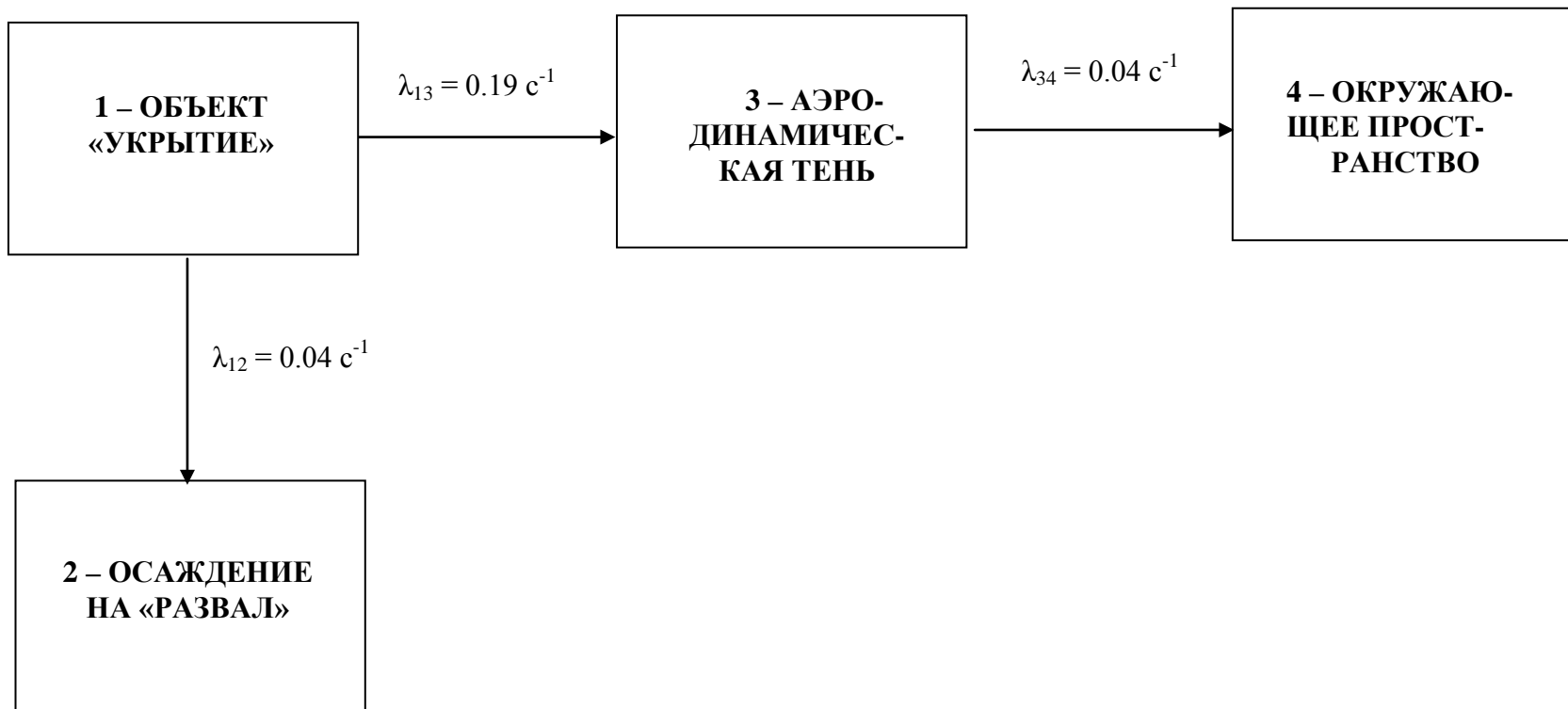


Рис. 13 Камерная модель для оценки времени существования примеси в области аэродинамической тени ОУ.

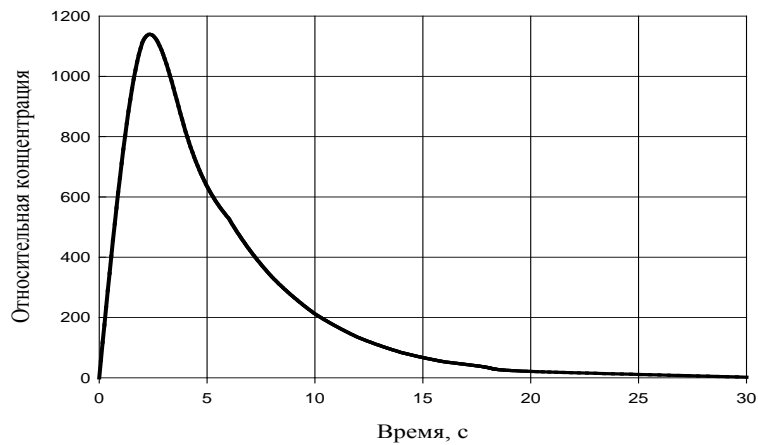


Рис. 14 Зависимость концентрации примеси от времени для области аэродинамической тени

Интересно отметить, что упоминавшийся интеграл концентраций для области аэродинамической тени на единицу массы выброса (ингаляция за длительное время) составляет по результатам расчета камерной модели примерно 10^{-6} ед.*м⁻³*с, а по результатам стационарной модели ОНД-86 (см. Главу 4) – примерно $4 \cdot 10^{-7}$ ед.*м⁻³*с (различие всего в 2.5 раза). Учитывая, что подходы ОНД-86 и камерной модели принципиально разные, совпадение полученных значений интегралов концентраций можно считать вполне удовлетворительным и предполагать методическую точность расчетных оценок не хуже, чем по порядку величины.

6. Максимальные радиологические последствия обрушения кровельных конструкций ОУ

6.1. Расчет максимально ожидаемого ингаляционного поступления

Ожидаемое поступление наиболее радиологически опасных нуклидов в $4.4 \cdot 10^{-7}$ г топлива 4-го энергоблока ЧАЭС с учетом фракционирования радионуклидов относительно базового состава в поверхностном загрязнении (здесь и далее предполагается 30%-е обогащение по ¹³⁷Cs) в единицах ДП_А ингаляционным путем приведено в Таблице 2. При расчете активностей радионуклидов в топливе использовались данные работы [17], значения годовых допустимых поступлений для персонала (ДП_А) взяты из работы [18].

Таким образом, максимальное поступление радионуклидов не превысит допустимые годовые нормы с коэффициентом запаса около 3. Учитывая методическую точность применяемых расчетных подходов можно утверждать, что предполагаемый выброс 3 кг топливной пыли респираторных размеров приведет к эффективной дозе для персонала менее 2 бэр. Следует также отметить, что речь идет о так называемой “коммитментной” дозе, которая будет накоплена только по истечении 50 лет после поступления радионуклидов.

Таблица 2. Ожидаемое поступление наиболее радиологически опасных нуклидов ($4.4 \cdot 10^7$ г топлива 4-го энергоблока ЧАЭС) в единицах ДПА ингаляционным путем на промплощадке «Укрытия» при обрушении кровельных конструкций (на начало 2000 г.).

Нуклид	^{137}Cs	^{90}Sr	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{241}Am
Поступление, Бк	570	380	3.1	2.2	3.6	220	7.
ДПА, Бк	1.e5	3.e4	60	60	60	3.e3	70
N ДПА	0.006	0.01	0.05	0.04	0.06	0.07	0.1
	Всего: менее ДПА по сумме радионуклидов						

6.2. Внешнее облучение

6.2.1. Внешнее облучение при нахождении внутри пылевого облака

Поскольку расчеты носят консервативный характер, воспользуемся дозовыми коэффициентами из работы [18] для бесконечного полупространства (учет конечного размера области тени приведет к уменьшению ожидаемых доз). Предполагая интеграл концентраций $3.4 \text{ мг(У)} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ ($4.4 \cdot 10^6 \text{ Бк} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ для $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ и $3 \cdot 10^6 \text{ Бк} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{90}Sr и ^{90}Y) и дозовые коэффициенты для внешнего облучения [19]:

$$\begin{aligned} \gamma & - \text{облучение } ^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba} - 3.81 \cdot 10^{-14} \text{ Зв} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}; \\ \beta & - \text{облучение базального слоя кожи } ^{137}\text{Cs} - 1.3 \cdot 10^{-14} \text{ Гр} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}; \\ \beta & - \text{облучение базального слоя кожи } ^{90}\text{Sr} - 9.6 \cdot 10^{-15} \text{ Гр} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}; \\ \beta & - \text{облучение базального слоя кожи } ^{90}\text{Y} - 4.7 \cdot 10^{-14} \text{ Гр} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}; \end{aligned}$$

получим, что:

- внешнее γ – облучение $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ в облаке (за бесконечное время экспозиции) будет не выше **$1.7 \cdot 10^{-7}$ Зв**;
- внешнее β – облучение базального слоя кожи ^{137}Cs в облаке (за бесконечное время экспозиции) будет не выше **$5.7 \cdot 10^{-8}$ Гр**;
- внешнее β – облучение базального слоя кожи ^{90}Sr в облаке (за бесконечное время экспозиции) будет не выше **$2.9 \cdot 10^{-8}$ Гр**;
- внешнее β – облучение базального слоя кожи ^{90}Y в облаке (за бесконечное время экспозиции) будет не выше **$1.4 \cdot 10^{-7}$ Гр**.

Данные по активностям радионуклидов в топливе брались из работы [17]. Видно, что дозы пренебрежимо малы по сравнению с ингаляцией.

6.2.2. Внешнее облучение при нахождении на радиоактивном следе

Основным дозообразующим нуклидом с точки зрения внешнего гамма-облучения от выпадений будет ^{137}Cs , его активность в 84 мкг топлива, соответствующим максимальной плотности выпадений на квадратный метр, составит примерно $1.1 \cdot 10^5$ Бк. Воспользуемся дозовым коэффициентом для выпадений из работы [20], соответствующим идеально гладкой поверхности (учет неровностей приведет к снижению дозы) $1.07 \cdot 10^{-2} \text{ мкР} \cdot \text{км}^2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{мКи}^{-1} = 2.9 \cdot 10^{-10} \text{ Р} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$, или, учитывая переход от экспозиционной дозы к эффективной эквивалентной для внешнего гамма излучения ($1 \text{ Р/час} = 0.646 \text{ сЗв/час}$, НРБУ-97), $1.9 \cdot 10^{-10} \text{ сЗв} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$.

Максимальная мощность эффективной дозы составит $1.1 \cdot 10^5 \cdot 1.9 \cdot 10^{-10} \approx 2.1 \cdot 10^{-5}$ сЗв/час, что примерно соответствует двукратному увеличению естественного фона гамма-излучения.

6.3. Вторичный пылеподъем

6.3.1. Вторичный пылеподъем с площади радиоактивного следа.

По результатам работы [21], для “свежих” Чернобыльских выпадений характерны значения коэффициента вторичного пылеподъема $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (n – целое число). Для консервативных оценочных расчетов примем $n = 5$. Оценим загрязнение воздуха трансурановыми элементами над поверхностью с плотностью выпадений $8.4 \cdot 10^{-5} \text{ г(U)/м}^2$. Результаты приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Прогноз максимального вторичного пылеподъема трансурановых элементов над областью радиоактивного следа, сформировавшегося после обрушения кровельных конструкций ОУ

Радионуклид	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am
Плотность поверхностного загрязнения, Бк/м ²	590	420	690	42000	1340
Воздушная концентрация, Бк/м ³	3	2.1	3.5	21	6.7
В ед. ДК _A ^{inhal}	100	70	117	21	223

Суммарное превышение среднегодовой допустимой концентрации составляет 531 ДК_A^{inhal}. Даже при постоянном ношении персоналом СИЗ органов дыхания, например - респиратора типа «Лепесток» с коэффициентом защиты 200, потребуются организационные меры по ограничению времени пребывания персонала на сформировавшемся после обрушения радиоактивном следе и/или проведение работ по пылеподавлению и предотвращению вторичного пылеподъема.

6.3.2. Вторичный пылеподъем с открытого “развала” после обрушения.

По данным работы [22], плотность снимаемого (способного ко вторичному пылеподъему) поверхностного загрязнения для открытых поверхностей “развала” по топливу оценивается в 18 г(U)/м^2 . После предполагаемого обрушения «откроются» следующие участки:

- крыши бывших северного и южного барабан-сепараторов (площадь ~ 1200 м²);
- «западная зона» (к западу от оси 50) (площадь ~ 1200 м²);
- площадь под трубным накатом (площадь ~ 2000 м²).

Таким образом, вторичное пылеобразование будет происходить из открыто лежащих 79 кг топливной пыли.

В качестве максимальной оценки вероятности перехода активности с загрязненной поверхности в воздух примем значение 10^{-4} час^{-1} [23], и, следовательно, скорость генерации воздушного топливного загрязнения над развалом составит $79000 \cdot 10^{-4} / 3600 \approx 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ г(U)} \cdot \text{с}^{-1}$.

По результатам Главы 4, максимальное значение приземной концентрации при выбросе с открытой поверхности “развала”, $c[\text{мг/м}^3]$, может с приемлемой точностью определяться через мощность выброса, $M[\text{г/с}]$, по формуле (15):

$$c = 4.2 \cdot 10^{-4} \cdot M$$

В нашем случае максимальное значение расчетной концентрации топливной пыли в приземном слое воздуха за счет выноса с открытой поверхности “развала” составит примерно $9.2 \cdot 10^{-10}$ г(U)/м³. Соответствующие оценки концентраций трансурановых элементов приводятся в Таблице 4.

Таблица 4. Максимально ожидаемые концентрации трансурановых элементов около ОУ за счет вторичного подъема топливной пыли с открытой поверхности «развала»

Радионуклид	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am
Воздушная концентрация, Бк/м ³	0.006	0.005	0.008	0.46	0.015
В ед. ДК _A ^{inhal}	0.2	0.17	0.27	0.46	0.5

Появление “открытой” поверхности “развала” приведет к увеличению концентрации трансурановых элементов в приземном слое воздуха промплощадки до значений свыше ДК_A^{inhal}. В принципе, учет того, что ингаляционная фракция пыли составляет около 50 % общего количества, приведет к снижению ожидаемых концентраций, однако данная поправка с учетом точности наших рассуждений не существенна.

7. Заключение

Максимально реалистичное, возможное на данном этапе, рассмотрение аварийного разрушения ОУ позволяет заключить следующее.

Наиболее опасным с точки зрения вероятности реализации и радиологических последствий является разрушение ОУ землетрясением с магнитудой около 5 по шкале MSK-64. При направлении воздействия Восток-Запад возможно разрушение стены по оси 50. Разрушение стены приведет к разрушению строительных конструкций к западу от оси 50, плоскому падению северных ключек и южных щитов на “развалы” над помещениями бывших барабан-сепараторов. Разрушение и падение блока балок Б2 с трубным накатом маловероятно. Вероятность реализации данного события с учетом направления сейсмического воздействия – около 10^{-2} год.

Наиболее опасным механизмом пылеподъема является сдув пыли с загрязненных поверхностей воздушными потоками, вытесняемыми падающими конструкциями. Вибрация поверхности приводит к подъему частиц с аэродинамическими диаметрами сотни микрон, не способных к дальнейшему распространению за пределы ОУ. При сдуве происходит перераспределение по размерам частиц в сторону увеличения в выбросе доли грубодисперсной фракции частиц по сравнению с начальным распределением размеров частиц на загрязненных поверхностях.

Вопрос о массе топливной пыли, способной к воздушному подъему при обрушении, является наиболее дискуссионным. Максимально реалистичный (для рассмотренного сценария обрушения) учет всех влияющих факторов и сравнение модельных представлений с имеющимся экспериментальным материалом позволяет предполагать, что при обрушении в составе образовавшегося над «развалом» пылевого облака будут находиться около 8 кг топливной пыли из которых около 3 кг будут представлены ингаляционной фракцией топливных частиц. Точность данной оценки автор оценивает не хуже, чем порядок величины.

Вынос образовавшегося после обрушения пылевого облака за пределы ОУ будет происходить за счет естественной вентиляции. Учет «перегруженности» облака общим количеством поднятой пыли (массовая концентрация пыли в начальный момент составит примерно 64 г/м³) позволяет предполагать, что не

менее 20% пыли осядут обратно на поверхности «развала». Отмечается сезонная зависимость величины пылевого выброса – учет абсолютных значений и разности температур подкровельного пространства и окружающего воздуха позволяют предполагать интенсивный выброс лишь в осенний период (август-октябрь).

Применимость расчетной модели методики ОНД-86 для объекта «Укрытие» доказана совпадением рассчитанных и наблюдаемых значений загрязненности приземного слоя воздуха в условиях текущего технического обслуживания ОУ. Результаты моделирования аварийного обрушения по указанной модели обнаруживают интересный факт - при аварийном выбросе, за счет «раскрытия» объекта после падения кровельных конструкций, существенно возрастают диаметр «устья трубы» в модели – т.е. площадь, с которой происходит выброс, и расход воздуха через подкровельное пространство за счет увеличения интенсивности воздухообмена. Данный эффект приводит к существенному увеличению высоты выброса, и, следовательно, влияние аэродинамической тени здания становится менее существенным. Максимальная концентрация примеси при аварийном обрушении достигается на расстоянии примерно 1900 м от ОУ.

Расчет распространения примеси при аварийном обрушении, проведенный по независимому от ОНД-86 подходу (камерной модели), дает те же результаты для предсказываемых интегралов концентраций (совпадение результатов с точностью 2.5 раза). Динамическая камерная модель дает время существования примеси в области аэродинамической тени около 20 секунд.

Расчет максимальных ингаляционных доз, ожидаемых при обрушении, дает величину меньшую, чем ДП_А по нормам НРБУ-97. Учитывая порядковую точность модели, можно утверждать, что ингаляция топыливной пыли при обрушении не превысит нескольких годовых поступлений. Предсказываемое внешнее облучение оказывается пренебрежимо мало.

Долговременные последствия обрушения при нашем рассмотрении оказываются более опасными – вторичный пылеподъем с образовавшегося радиоактивного следа и открытой поверхности «развала» ОУ приведет к возрастанию концентрации трансурановых элементов в приземном слое воздуха от нескольких до нескольких сот допустимых концентраций ДК_А^{inhal}, что потребует специальных мер по фиксации пыли и применения средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Литература

1. Проектные критерии для «Интегрированного проекта стабилизации». Пакет «А» ПОМ, WBS A01 13000 – Док. 1.4, Киев-Чернобыль – 2000.
2. Интегрированный отчет по стабилизации, экранированию и доступу (WBS A01 18000 – Док. 1.6б), ППП А, Киев-Чернобыль – 2000.
3. Герасько В.Н., Ключников А.А., Корнеев А.А., Купный В.И. и др. Объект «Укрытие». История, состояние, перспективы. Киев: Интерграфик, 1997. – 224 с.
4. Богатов С.А. Оценка количества пыли, способной ко вторичному подъему при обрушении кровельных конструкций объекта «Укрытие». Препринт РНЦ «КИ», Москва, 2001 (в печати).
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т., т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
6. Mishima J., Schwendiman L.C., Ayer J.E. An Estimate of Airborne Release of Plutonium From Babcock and Wilcox Plant As a Result of Severe Wind Hazard and Earthquake, PNL-2812, Richland, Washington, 1978.
7. Богатов С.А. Применение рекомендаций ОНД-86 для расчетов воздушного распространения примеси за пределы объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие», № 00-3, Чернобыль – 2000.
8. Гебхард Б., Джалурия И., Махаджан П., Саммакия Б. Свободно конвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991. – 528 с.
9. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
10. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. Под ред. Е.И.Теворовского и И.А.Терновского. М.: Атомиздат, 1980.

11. Метеорология и атомная энергия. Пер. с англ. под ред. Н.Л.Бывовой и К.П.Махонько. Л.: Гидрометеоздат, 1975.
12. Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor effluents for the purpose of evaluating compliance with 10 CFR, part 50. – US Nuclear Regulatory Commission/ Regulatory Guide 1. 109. Appendix 1, 1976.
13. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения Нормативно технический документ. МХО Интератомэнерго, 1984.
14. Богатов С.А. Применение рекомендаций ОНД-86 для расчетов воздушного распространения примеси за пределы объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие», № 00-3, Чернобыль – 2000.
15. Meteorology and atomic energy. Ed. by D.H.Slade, Air Research Laboratories. U.S. Atomic Energy Commission, 1968.
16. Богатов С.А. Применение рекомендаций ОНД-86 для расчетов воздушного распространения примеси за пределы объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие», № 00-3, Чернобыль – 2000.
17. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие» инв. № 216 от 06.09.96. Чернобыль – 1996.
18. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). Киев –1997.
19. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
20. Beck H.L. Exposure rate conversion factors for radionuclides deposited on the ground. EML-378, July 1980.
21. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А., Петров В.Н., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Л., Гидрометеоздат, 1990. – 296 с.
22. Богатов С.А. Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» № 00-2. Чернобыль – 2000.
23. Биткалов Н.З. Вентиляция предприятий атомной промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.