

УДК 551.515.3:621.039.5

**РЕЖИМ ПРОХОЖДЕНИЯ СМЕРЧЕЙ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС
И ВЕРОЯТНОСТНЫЙ КРИТЕРИЙ СМЕРЧЕОПАСНОСТИ**

*Брюхань Ф.Ф. (ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Новгородская обл.),
Потапов А.Д. (ФГОУ ВПО «МГСУ», г. Москва)*

Смерчи относятся к наиболее опасным метеорологическим явлениям, способным разрушать здания и сооружения [1, 2]. Другая особенность заключается в их крайне редком проявлении. Поэтому возможность прохождения смерчей и связанные с ними нагрузки и воздействия учитываются лишь при размещении и проектировании объектов, к надежности которых предъявляются особые требования, и, в частности, АЭС.

Смерчи образуются под хорошо развитыми кучево-дождевыми облаками и распространяются в виде гигантских облачных столбов, опускающихся в виде воронок к поверхности земли или моря. Скорость ветра в таких вихрях может достигать 100 м/с и более. В результате вращения воздуха в смерче возникает разрежение, вокруг его центра (ядра) — сильное, до 70—90 м/с восходящее движение воздуха [1, 3]. Это приводит к тому, что встречающиеся на их пути даже тяжелые предметы всасываются в область смерча, поднимаются и переносятся на большие расстояния. Полоса разрушений, обусловленная прохождением смерча, относительно невелика и составляет обычно несколько десятков или сотен метров в ширину и несколько километров или десятков километров в длину.

Характеристики наблюдаемых смерчей — вектор скорости движения воздуха в вихре, поступательную скорость перемещения, перепад давления между периферией и центром вихря удается измерить в редких случаях. Поэтому основные данные о прохождении смерчей носят качественный характер, что в значительной мере затрудняет их статистический анализ. Некоторые ориентировочные количественные характеристики придает смерчам шкала Фуджиты [3], позволяющая установить класс их интенсивности по данным визуальных наблюдений. Исходя из установленного класса интенсивности, можно с помощью простых эмпирических зависимостей определить их основные характеристики [4, 5].

Физико-географические условия территории, прилегающей к площадке Белорус-

ской АЭС. Согласно схеме физико-географического районирования территории Белоруссии 30-километровая зона вокруг АЭС находится в пределах Белорусско-Валдайской физико-географической провинции с выделением двух округов: Белорусского Поозерья и Белорусской гряды и Нарочано-Вилейской низины.

В системе дифференциации природно-территориальных комплексов рассматриваемый район характеризуется подтаежными ландшафтами. Своеобразие ландшафтной структуры определяют следующие типы ландшафтов: озерно-ледниковые комплексы, на долю которых приходится около 70% территории, моренно-озерные и холмистоморенно-озерные ландшафты. На территории, прилегающей к АЭС, преобладают водно-ледниковые ландшафты с прерывистым покровом водно-ледниковых сушесей.

Территория 30-километровой зоны Белорусской АЭС приурочена к положительной тектонической структуре Русской плиты — Белорусской антеклизе. Большая (северная и центральная) часть территории располагается в пределах Прибалтийской моноклинали и Вилейского погребенного выступа Белорусской антеклизы. Юг региона характеризуется приуроченностью к отрицательной структуре кристаллического фундамента антеклизы. Локальными неотектоническими структурами являются Ошмянский и Нарочанский купола. Породы кристаллического фундамента залегают на глубине от 200—220 до 300—400 м ниже уровня моря. Осадочный чехол рассматриваемого региона сложен преимущественно породами ордовикско-силурийского возраста, которые в северной части перекрываются отложениями девонского, на юге — мелового возраста. В пределах участка можно выделить два типа морфоструктуры: денудационная субгоризонтальная равнина с пологоволнистой поверхностью кровли коренных пород и примерно таким же характером дневного рельефа и структурно-денудационная равнина, совпадающая со структурным выступом фундамента с высокой

расчлененностью поверхности доантропогенных отложений.

Максимальные высоты локализованы на юго-западе и западе территории (308 и 300 м) в пределах Ошмянской гряды и Островецкой возвышенности. Немного ниже них — Свирская гряда, расположенная на востоке (до 233 м). Минимальные отметки высот характерны для Вилейской низины (105—130 м) — урез воды в р. Вилии. Абсолютный перепад высот составляет, таким образом, более 200 м.

В неотектоническом плане территория относительно устойчива. Ее северная часть испытывает нисходящее вертикальное движение со скоростью до 1 мм/год. По отношению к ней центральная часть находится в зоне относительного воздымания и только на крайнем юго-востоке, в верхнем течении р. Ошмянки, наблюдается локальное абсолютное поднятие. Исходя из сейсмического районирования, большая часть территории находится в зоне сейсмической сотрясаемости менее 5 баллов и только крайний юго-юго-запад территории в пределах Ошмянской возвышенности входит в зону сотрясаемости 5 и даже 6 баллов.

В геоморфологическом отношении территория региона находится на стыке двух геоморфологических областей: Белорусского Поозерья и Центрально-Белорусских краевых ледниковых возвышенностей и гряд. Территория 30-километровой зоны района исследования располагается в пределах трех геоморфологических районов: Свирской краевой ледниковой гряды, Вилейской моренно-водно-ледниковой низины, а также системы Ошмянских краевых ледниковых гряд.

По степени смерчеопасности исследуемая территория находится в пределах подзоны А—Л карты [1]. Эта подзона большей частью простирается по территории Белоруссии и Литвы и охватывает незначительные части Латвии, Украины и России.

Исходные данные. Степень смерчеопасности территории размещения Белорусской АЭС и расчетные характеристики вероятного смерча — класс интенсивности, максимальная горизонтальная скорость вращательного движения стенки смерча, длина и ширина пути прохождения, перепад давления между периферией и центром воронки определялись в рамках инже-

нерно-гидрометеорологических изысканий, проводимых в 2013 г.

Исследование выполнено для смерчеопасной подзоны А—Л. В качестве исходных данных использовали каталог смерчей, зарегистрированных на территории СССР в 1844—1988 гг. и России [5], дополненный данными Гидрометцентра Белоруссии и средств массовой информации за 1988—2012 гг. (табл. 1). Всего в подзоне А—Л в 1844—2012 гг. зарегистрировано 60 смерчей от нулевого до третьего класса по шкале Фуджиты [3]. Статистическое распределение зарегистрированных смерчей в подзоне приведено в табл. 2. Помимо статистического распределения смерчей, в расчетах использовали площадь подзоны А—Л, период наблюдений, коэффициент, учитывающий отношение числа фактических смерчей к числу зарегистрированных.

Методика. Степень смерчеопасности территории размещения АЭС (вероятность прохождения в пределах площадки АЭС) и расчетные характеристики смерчей определяли согласно рекомендациям [4, 5], основанным на методике [1]. Вероятность (частота) P_s прохождения через заданную точку (площадку АЭС) смерчеопасного района или зоны площадью A , в пределах которых регистрировались смерчи за период T лет, на реактор в год, определяется следующим образом:

$$P_s = S/AT,$$

где S — суммарная площадь разрушений всеми зарегистрированными смерчами в данном районе (зоне). Другие расчетные характеристики, в том числе класс интенсивности определяли согласно [1, 4].

В РБ-022—01 [5] дано иное определение вероятности — $1000P_s$, которая интерпретируется как вероятность возникновения смерчеопасного события в районе размещения АЭС в пределах окружающей площадку АЭС территории площадью 1000 км^2 . Однако такая интерпретация вероятности прохождения смерчей неточна. Например, она имеет размерность км^2 на реактор в год. Тем не менее определение расчетного класса интенсивности k , исходя из формулы (5) Приложения 6 к РБ-022—01

$$F(k) = 1 - P_0/P_s,$$

Таблица 1. Каталог смерчей в пределах подзоны А—Л, зарегистрированных в 1988—2012 гг.

Место прохождения	Координаты (с.ш./в.д.)	Дата	Время (моск.)	Класс	Длина пути, км	Ширина пути, м	Примечание
Белоруссия							
Гомельская обл., Ветковский р-н	52°26'/31°15'	04.06.1988	18—19 ч	1	—	—	Разрушены 0,5 га теплиц, склад для хранения газовых баллонов, сорваны крыши зернотока и ангара для хранения техники.
Витебская обл., Миорский р-н, дер. Турково	55°40'/28°05'	11.08.1990	15 ч 15 мин — 15 ч 30 мин	2	10	10—100	Сильное полегание посевов озимых культур. Разрушено девять строений, небольшие строения перенесены на несколько сот метров, сорваны полностью или частично крыши домов, вырваны с корнями и сломаны деревья, унесены клетки с кроликами.
Минская обл., Воложинский р-н	54°06'/26°31'	06.09.1992	Около 15 ч	2	—	—	Вырваны с корнями и сломаны деревья, сорваны крыши домов, разрушены хозпостройки, повреждены ЛЭП. В Ошмянском районе повреждены 64 дома, разрушен телятник, конюшня, клуб, школа.
Гродненская обл., Ошмянский и Сморгонский р-ны	54°30'/26°10'	17.08.1993	Около 18 ч	2,5	4—5	—	В Шарковщинском р-не повреждены и частично сорваны крыши, выбиты стекла, вырваны фронтоны у жилых и производственных зданий, сломано много плодовых деревьев, погибли зерновые и овощные культуры, опрокинут комбайн. В Миорском районе полностью разрушено шесть построек, сорвано и повреждено много крыш, фронтонов, окон в жилых и производственных помещениях. Опрокинут 35-тонный прицеп, поднят в воздух и унесен на 20 м колхозный пастух, сломаны и вырваны с корнями деревья, повреждены ЛЭП.
Витебская обл., Шарковщинский и Миорский р-ны	55°30'/27°30'		Середина дня				
г. Могилев	53°57'/30°04'	16.05.1994	Около 16 ч	0	—	—	Образовались завалы вывороченных с корнями огромных деревьев, покорежены здания и фонари освещения.
Могилевская обл., Славгородский р-н	53°27'/31°01'	30.07.1994	Около 18 ч	1	—	—	Повалены и вывернуты с корнями плодовые деревья, повреждены и снесены крыши зданий, повреждены ЛЭП.
Гомельская обл., Мозырский р-н	51°57'/29°10'	04.07.1995	18 ч 30 мин — 18 ч 45 мин	1	—	—	Разрушен зерновой склад, вентиляционные шахты животноводческого комплекса, крыши на 13 хозпостройках, деформированы металлические конструкции теплиц.
Гомельская обл., Буда-Кошелевский р-н	52°43'/30°34'	01.06.2009	2-я половина дня	2	—	—	Частичное повреждение домов и хозпостроек, сорваны крыши двух частных домов. Сломаны опоры ЛЭП. Сорван малый купол церкви.
Гомельская обл., Чечерский р-н, дер. Глазовка	52°55'/30°55'	07.06.2009	18 ч 15 мин — 18 ч 25 мин	2	—	400	Разрушены здания, сорваны крыши, повреждены ЛЭП. Поднят и перевернут 5-тонный прицеп. Сломаны и вырваны с корнями деревья.
г. Бобруйск	53°06'/29°13'	21.07.2010	Середина дня	0,5	—	—	Перенесено несколько валунов весом около 30 кг на расстояние несколько метров, сломаны деревья в лесопосадке.
Гомельская обл., Гомельский р-н, дер. Головинцы и агрогородок Улуковье	52°24'/31°04'	25.08.2012	Вечер	1,5	—	—	Сорваны крыши двух домов, сломаны и вырваны с корнями деревья.
Литва							
Паневежеский уезд, Рокишкский р-н, г. Чедасай	55°58'/25°35'	11.06.2012	2-я половина дня	1	—	—	Снесены крыши нескольких домов, сломаны деревья.

*Прочерк означает отсутствие данных.

Таблица 2. Статистическое распределение смерчей в подзоне А—Л по классу интенсивности шкалы Фуджиты в 1988—2012 гг.

Класс интенсивности	Число смерчей
0	10
0,5	4
1	23
1,5	5
2	15
2,5	1
3	2
>3	—

где $F(k)$ — вероятность не превысить класс k среди смерчей, зарегистрированных в данном районе, следовательно, и другие характеристики, дает те же результаты, что и при использовании РД 95 10444—91 [4], поскольку в РБ-022—01 P_0 (уровень отбора по вероятности) и P_s одновременно повышены в 1000 раз.

Результаты. Результаты оценки степени смерчеопасности площадки Белорусской АЭС и расчетных характеристик вероятного смерча следующие:

Степень смерчеопасности, реактор-год . . .	$2,94 \cdot 10^{-6}$
Класс интенсивности по шкале Фуджиты . . .	2,5
Максимальная горизонтальная скорость вращательного движения стенки смерча, м/с . . .	70
Длина пути прохождения смерча, км . . .	16
Ширина пути прохождения смерча, м . . .	160
Перепад давления между периферией и центром воронки, гПа . . .	60

В качестве критерия необходимости учета смерчей при проектировании АЭС принималось превышение вероятности их прохождения через площадку порогового значения (уровня отбора по вероятности) P_0 , составляющего 10^{-7} на реактор в год [1, 4]. Большинство действующих и проектируемых АЭС в нашей стране расположены в смерчеопасных зонах, где вероятность их прохождения выше P_0 .

Необходимо отметить, что до начала разработки нормативов [4, 5], предусматривающих учет смерчей при строительстве объектов использования атомной энергии, режим их прохождения по территории СССР и России был изучен недостаточно детально. Однако опыт исследований режима прохождения смерчей, накопленный к настоящему времени в рамках инженерных изысканий, указывает на целесооб-

разность уточнения подхода к оценке их воздействия на АЭС по следующим причинам.

В нашей стране и других странах—членах МАГАТЭ требования к безопасности ядерных объектов устанавливаются из условия не превысить вероятность запроектной аварии с предельным аварийным выбросом (сбросом) $P_0 = 10^{-7}$ 1/год [6]. Вероятность прохождения на реактор в год смерча с классом интенсивности k через площадку АЭС, способного вызвать такую запроектную аварию, можно представить как

$$P = P_s [1 - F(k)] P_a(k),$$

где $F(k)$ — вероятность не превысить класс k среди смерчей, зарегистрированных в данном районе или зоне (она определяется исходя из статистики зарегистрированных смерчей [4, 5]); $P_a(k)$ — безразмерная вероятность предельного аварийного выброса (сброса) в окружающую среду при запроектных авариях, вызванных воздействием смерча при реализации события воздействия смерча класса k на АЭС.

Расчетный класс интенсивности вероятного смерча можно определить из условия

$$P_s [1 - F(k)] P_a(k) = P_0. \quad (1)$$

При $P_a(k) = 1$ это условие соответствует условию [4]. Таким образом, воздействие смерча не приведет неизбежно к запроектной аварии, а критерий необходимости учета смерчей при проектировании АЭС как превышение вероятности их прохождения через площадку порогового значения 10^{-7} 1/год согласно РД 95 10444—91 [4] переоценен. Поэтому пороговый уровень $P_0 = 10^{-7}$ 1/год, помимо возможности прохождения смерчей через площадку АЭС, должен также учитывать возможность разрушения активной зоны реактора с последующим предельным аварийным выбросом (сбросом). При этом класс интенсивности расчетного смерча следует определять исходя из выражения (1). Очевидно, что в этом случае расчетный класс k снизится, пороговая вероятность прохождения смерчей через площадку АЭС, равная P_0/P_a , повысится. Можно предположить, что пороговая вероятность P_0/P_a , обуславливающая решение об учете или неучете смерчей при проектировании АЭС, повысится в 10—100 раз.

Расчет нагрузок от ветрового напора, перепада давления между периферией и центром смерча, ударного воздействия тел, увлеченных смерчем, а также вероятности P_a представляет

собой совокупность отдельных задач и является предметом дальнейшего исследования. В грубом приближении перечисленные нагрузки оцениваются в работах [7—9].

Инженерная защита АЭС от смерчей предусматривает большие затраты для нового строительства каждого объекта, а также для его расширения или реконструкции. В случае, если при дальнейших исследованиях будет установлено, что пороговая вероятность, обуславливающая решение об учете или неучете смерчей, превысит 10^{-5} 1/год, на территории нашей страны не окажется смерчеопасных зон. При этом будет отсутствовать необходимость проектирования дорогостоящей защиты от смерчей без ущерба для безопасности АЭС.

Таким образом, полученные в работе результаты указывают на целесообразность уточнения вероятностного критерия смерчеопасности при размещении и проектировании АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюхань Ф.Ф., Ляхов М.Е., Погребняк В.Н. Смерчеопасные зоны в СССР и размещение атомных стан-

- ций. — Изв. АН СССР, сер. географическая, 1989, № 1, с. 40—48.
2. Калиберда И.В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Безопасность объектов использования атомной энергии. М.: Логос, 2002. 543 с.
3. Fujita T. Tornadoes and downburst in the context of generalized planetary scales. — J. Atmospheric Sci., 1981, v. 38, № 8, p. 1511—1534.
4. Рекомендации по определению расчетных характеристик смерчей при размещении атомных станций. РД 95 10444—91. М.: Минатомэнергопром СССР, 1991.
5. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. РБ-022—01. — Вестник Госатомнадзора России, 2002, № 1, с. 59—90.
6. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064—05. М.: Ростехнадзор, 2005.
7. Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
8. Брюхань Ф.Ф., Погребняк В.Н., Саргсян А.Е. Оценка смерчеопасности территорий с АЭС. — Строительная механика и расчет сооружений, 1991, № 5, с. 83—87.
9. Simiu E., Scanlan R. Wind Effects on Structures: an Introduction to Wind Engineering. Third Edition. NY: J. Wiley & Sons, 2000. 590 p.

Поступила в Редакцию 23.08.13

Рефераты статей

УДК 621.039.534.36 + 621.039.531

Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моркин М.С., Черепнин Ю.С., Бедин В.В., Шушлебин В.В., Колотухин С.П., Мазурин И.М. Исследование радиолиза фторуглеродного рабочего тела второго контура АЭС. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 243—246.

В ходе работ по обоснованию возможности применения альтернативных воде фторуглеродных рабочих тел во втором контуре АЭС выполнен реакторный эксперимент по изучению продуктов радиолиза октафторпропана при низкой температуре. Показатели радиационной стойкости данного вещества позволяют в дальнейшем перейти к экспериментам по высокотемпературному облучению, что позволит обосновать радиационную стойкость фторуглеродов в условиях, приближенных к рабочим условиям второго контура перспективных реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Рис. 2, табл. 2, список лит. 7 назв.

УДК 621.039.534...24

Семченков А.А., Новосельский О.Ю., Лемехов Ю.В., Хижняк А.Г., Шпанский С.В., Шишов В.П. Исследование теплоизоляционных свойств пароводяного зазора в опускных трубах парогенератора. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 246—250.

Приведены результаты экспериментального исследования теплопередачи через зазор, заполненный пароводяной смесью. Показано, что теплопередача через такой зазор существенно отличается от теплопередачи через твердую

стенку аналогичной геометрии. Тепловой поток через зазор, в котором конденсируется пар, почти не зависит от температуры греющей среды, но на него влияет близость температуры «холодной» стенки к температуре насыщения. Рис. 5, табл. 1, список лит. 2 назв.

УДК 621.039.57

Курский А.С. Радиолиз теплоносителя и методы обеспечения водородной взрывозащиты корпусного кипящего реактора ВК-50. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 250—255.

Представлены результаты исследования водородной взрывозащиты корпусного кипящего реактора с естественной циркуляцией теплоносителя. Проанализированы экспериментальные данные о выходе радиолитических газов в различных режимах эксплуатации реактора. Показана эффективность отработанной на установке ВК-50 технологии сжигания радиолитического водорода при нормальной эксплуатации и в аварийных режимах с разгерметизацией контура теплоносителя. Рис. 4, табл. 3, список лит. 6 назв.

УДК 621.039.531

Новиков В.В., Шишов В.Н., Шевяков А.Ю., Воеводин В.Н., Бородин О.В., Брык В.В., Василенко Р.Л. Исследование микроструктуры циркониевых сплавов, облученных ионами циркония на ускорителе. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 255—260.

Объектом исследования являлись образцы сплавов Э-110, -110М, -125, -635М, облученные ионами циркония на ускорителе до высокой повреждающей дозы. В статье