

УДК 621.039.586

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА ИГНАЛИНСКОЙ АЭС
С УЧЕТОМ СПЕЦИФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АВАРИЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ***Воронов Р., Алзбутас Р. (Литовский энергетический ин-т, г. Каунас, Литва)*

Неотъемлемой частью вероятностного анализа безопасности АЭС является оценка вероятностей ошибок персонала, задачи которой заключаются в определении наиболее важных для безопасности АЭС действий персонала, факторов, оказывающих наибольшее влияние на операторов, и вероятностей ошибок операторов для каждого действия. Действия человека зависят от многих факторов, таких, как подготовка и опыт, стресс, наличие информации. Эти факторы, в свою очередь, могут различаться для разных исходных событий и сценариев развития аварии. В связи с этим одни и те же действия операторов в условиях разных аварийных сценариев будут иметь разные вероятности ошибок.

Действия персонала при аварийной ситуации. При аварийной ситуации операторы АЭС выполняют действия по останову и расхолаживанию реактора, которые включают контроль автоматического срабатывания систем безопасности (или аналогичные ручные действия), контроль параметров энергоблока, управление работой систем безопасности. Действия операторов являются составной частью общего хода ликвидации аварийной ситуации, они четко определены и описаны в аварийных инструкциях. Важность действий оператора существенно возрастает, если ход развития аварии отличается от ожидаемого сценария, например, при несрабатывании систем безопасности или возникновении дополнительных отказов. В таких случаях операторы должны продублировать включение систем, использовать резервные системы или оборудование взамен отказавших, а также принимать дополнительные меры для поддержания параметров безопасности станции в заданных пределах. Такие действия включают в себя стадии оценки ситуации, принятия решений, их выполнения и контроля результатов, в зависимости от которых принимаются следующие решения. При этом факторы, влияющие на действия операторов, являются специфичными для разных сценариев, т.е. их влияние и соответственно вероятности ошибок будут разными для одних и тех же действий, выполняемых при раз-

ных обстоятельствах в зависимости от исходного события и хода развития аварии.

Основные стадии анализа. На первой стадии были определены ключевые для безопасности Игналинской АЭС действия операторов. Источником информации служили модель вероятностного анализа безопасности, эксплуатационные и аварийные инструкции, собеседования с оперативным персоналом. Далее для каждого действия были определены:

критерии успешного выполнения — последовательность операций, число и квалификация операторов, место выполнения действия;

граничные условия — исходное событие, дополнительные отказы оборудования или ошибки персонала;

время — момент начала действия и соответствующие сигналы, требуемое и имеющееся время на выполнение действия;

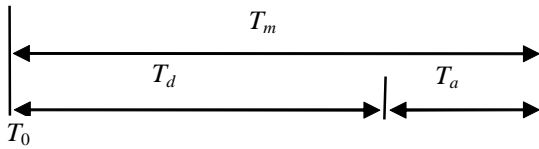
зависимости — взаимосвязанные действия, возможные варианты действия и их приоритеты.

На основе собранной информации была выполнена количественная оценка вероятностей ошибок.

Количественная оценка с использованием методов ASEP и THERP. В настоящее время согласно [1] для анализа действий персонала наиболее часто используются методы ASEP (Accident Sequence Evaluation Procedure) [2] и THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) [3]. Метод THERP описывает подробную, но достаточно трудоемкую процедуру анализа действий персонала на основе дерева решений. Метод ASEP является упрощенной версией THERP, он менее трудоемкий, но при этом позволяет получать достаточно адекватную оценку вероятностей ошибок.

Действия при аварии включают стадии 1) распознавания ситуации, обдумывания и принятия решения и 2) выполнения действия. На каждую стадию влияет разный набор факторов, и вероятность ошибки персонала на каждой стадии оценивается отдельно. Общая вероятность ошибки персонала P оценивается как

$$P = P_d + P_a,$$



Р и с. 1. Время на распознавание ситуации и выполнение действия

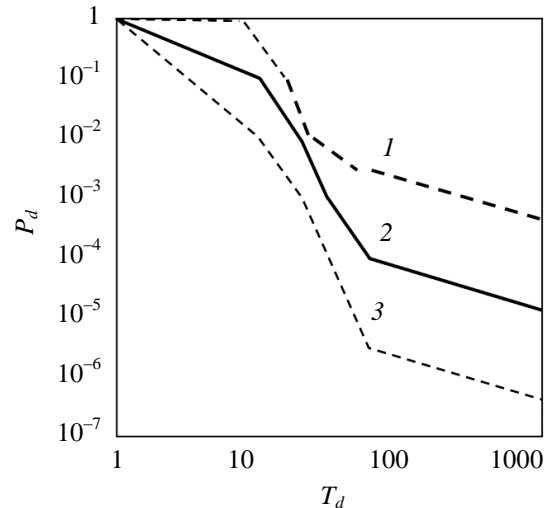
здесь P_d — средняя оценка вероятности ошибки верно определить требуемые действия и принять решение; P_a — средняя оценка вероятности ошибки выполнить требуемое действие.

Для оценки указанных вероятностей требуется проанализировать время выполнения действия. На основании детерминистического анализа определяется максимальный промежуток времени для выполнения действия при аварийной ситуации T_m , например, время до перегрева активной зоны реактора. Указанный промежуток включает время на распознавание ситуации и принятие решения T_d и на выполнение действия T_a , как показано на рис. 1.

Промежуток времени T_a , которого достаточно для выполнения действия, определяется путем анализа последовательности действий и собеседований с оперативным персоналом. Промежуток времени T_d для распознавания ситуации (диагностики) и принятия решения о дальнейших действиях определяется простым вычислением: $T_d = T_m - T_a$.

Применение метода ASEP основано на предположениях, что время является ключевым фактором на стадии распознавания и принятия решения и что ошибка на этом этапе ведет к невыполнению всего действия. Номинальная вероятность P_d ошибки диагностики и ее границы неопределенности оцениваются с помощью графиков или таблиц ASEP в зависимости от времени T_d (рис. 2) [2].

График ASEP содержит три кривые зависимости вероятности ошибки от времени на принятие решения. Выбор кривой выполняется по указаниям, содержащимся в описании метода ASEP. Нижняя кривая является оптимистичной оценкой и выбирается, когда факторы способствуют правильному выполнению действия, например, аварийная ситуация хорошо знакома операторам и многократно отрабатывалась на тренажере. Верхняя граница выбирается при наличии неблагоприятных факторов, например, если ситуация не описана в инструкциях. Средняя кривая выбирается, если не подходят критерии выбора как верхней, так и нижней границы.



Р и с. 2. Вероятность ошибки на этапе диагностики и принятия решения: 1, 3 — верхняя и нижняя граница неопределенности соответственно; 2 — медиана

Вероятность невыполнения действия P_a определяется по таблицам метода THERP [3] в зависимости от сложности действия, процедур, квалификации и подготовки.

Оценка неопределенности вероятностей ошибок персонала. В таблицах THERP и ASEP вероятности представлены в виде номинальных значений и факторов неопределенности. Принимается, что вероятность ошибок имеет логарифмически нормальное распределение и номинальное значение является медианой $p_{0,5}$ такого распределения. Средняя M вычисляется из медианы по формуле

$$M = p_{0,5} \exp \left(0,5 \left(\frac{\ln(E_f)}{1,6449} \right)^2 \right).$$

Неопределенность оценки вероятности выражается с помощью фактора неопределенности E_f , который для логарифмически нормального распределения рассчитывается по формуле

$$E_f = p_{0,95}/p_{0,5} = p_{0,5}/p_{0,05} = (p_{0,95}/p_{0,05})^{0,5}.$$

Границы неопределенности вероятности ошибки персонала P рассчитываются на основе характеристик неопределенности P_a и P_d , полученных из таблиц. Исходя из предположения, что вероятность ошибок имеет логарифмически нормальное распределение, имеем, что натуральные логарифмы вероятности $\ln(P_a)$ и $\ln(P_d)$ имеют нормальное распределение, поэтому значения средних $\mu_{\ln}(P_a)$, $\mu_{\ln}(P_d)$ и среднеквадратических отклонений $\sigma_{\ln}(P_a)$, $\sigma_{\ln}(P_d)$ могут быть

рассчитаны на основе известных значений медианы $p_{0,5}$ и фактора неопределенности E_f :

$$\mu_{\ln}(P_i) = \ln(M); \sigma_{\ln}(P_i) = \ln(E_f)/3,29.$$

Средняя и дисперсия вероятности ошибки персонала определяются по формулам

$$\begin{aligned} \mu(P_i) &= \exp[\mu_{\ln}(P_i) + \sigma_{\ln}^2(P_i)/2]; \\ \sigma^2(P_i) &= \exp[\sigma_{\ln}^2(P_i) + 2\mu_{\ln}(P_i)][\exp(\sigma_{\ln}^2(P_i)) - 1]. \end{aligned}$$

Метод установления границ неопределенности, принятый в THERP, основан на работах, показывающих, что сумма логарифмически нормально распределенных величин может быть адекватно аппроксимирована также логарифмически нормальным распределением. Средняя и дисперсия общей вероятности ошибки персонала P соответственно являются

$$\mu(P) = \sum \mu(P_i); \sigma^2(P) = \sum \sigma^2(P_i).$$

Далее, исходя из нормального распределения величины $\ln(P)$, рассчитываются средняя и дисперсия логарифмически нормального распределения:

$$\begin{aligned} \mu_{\ln}(P) &= \ln\left(\frac{\mu(P)}{\sqrt{1 + \sigma^2(P)/\mu^2(P)}}\right); \\ \sigma_{\ln}^2(P) &= \ln\left(1 + \frac{\sigma^2(P)}{\mu^2(P)}\right). \end{aligned}$$

Таким образом, медиана и границы неопределенности оценки вероятности P :

$$\begin{aligned} M(P) &= \exp \mu_{\ln}(P); \\ p_{0,05}(P) &= \exp[\mu_{\ln}(P) - 1,6449\sigma_{\ln}(P)]; \\ p_{0,95}(P) &= \exp[\mu_{\ln}(P) + 1,6449\sigma_{\ln}(P)]. \end{aligned}$$

Приведем примеры анализа факторов, влияющих на действия персонала, и оценки вероятностей ошибок.

Подача воды из системы аварийного охлаждения реактора при аварии с потерей теплоносителя. При авариях с потерей теплоносителя предусмотрено автоматическое срабатывание системы аварийного охлаждения реактора (САОР) с подачей воды в раздаточный групповой коллектор. При несрабатывании системы оператор вручную должен продублировать включение необходимого оборудования и обеспечить требуемый расход воды САОР.

Критерии успешности: условия, требующие выполнения действия, — наличие условий для срабатывания САОР и отсутствие показаний о работе САОР; условия окончания временного промежутка — перегрев активной зоны реактора; цель действия — предотвратить перегрев активной зоны; предпринимаемые действия — открыть арматуру подачи воды от быстродействующей САОР, включить насосы и открыть арматуру подачи воды от САОР длительного расхолаживания; исполнитель действия — ведущий инженер управления блоком под наблюдением заместителя начальника смены станции; место выполнения действия — блочный щит управления, рабочее место ведущего инженера управления блоком; используемые процедуры — симптомно-ориентированная аварийная инструкция, инструкция по ликвидации аварийных ситуаций.

Временные критерии успешности: в случае крупной аварии с потерей теплоносителя перегрев активной зоны реактора без охлаждения наступит через 600 с, для средней аварии это время составляет 1500 с. Срабатывание одного из трех каналов быстродействующей САОР отдаляет перегрев реактора на 2 мин. Таким образом, промежуток времени T_m для ее включения составляет для этих групп исходных событий 10 и 25 мин соответственно, T_m для включения САОР длительного расхолаживания после срабатывания быстродействующей САОР — 12 мин для крупной и 27 мин для средней аварии. Принимается, что на выполнение действия (время T_a) требуется 1 мин. Оставшееся время T_d — максимальное время на распознавание ситуации и принятие решения составляет от 9 до 26 мин в зависимости от аварийного сценария. Оценка времени представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Оценка времени на выполнение действия «ручной пуск САОР при аварии с потерей теплоносителя», мин

Действие — пуск САОР	T_m	T_a	T_d
Быстродействующая САОР, крупная течь	10	1	9
САОР длительного расхолаживания, крупная течь	12	1	11
Быстродействующая САОР, средняя течь	25	1	24
САОР длительного расхолаживания, средняя течь	27	1	26

Граничные условия: на данном этапе анализа определяются все факторы, влияющие на оператора во время выполнения действия. Так как во время аварии с потерей теплоносителя параметры станции изменяются быстро и операторы должны обработать большое количество информации за короткое время, принимается высокий уровень стресса. Операторы блочного щита управления следят за показаниями приборов и выполняют действия в соответствии с их опытом и аварийными инструкциями. Операторы имеют хорошо видимую индикацию основных параметров и процессов. Так как работа САОР является одним из приоритетных контролируемых параметров, ее отказ распознается очень скоро. На распознавание и принятие решения также влияют одновременно выполняемые действия и их приоритеты. Так, ведущий инженер управления блоком одновременно должен следить за параметрами контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), расходом питательной воды, давлением в барабанах-сепараторах, срабатыванием защиты и автоматики, работой других систем безопасности. Тем не менее наблюдение за срабатыванием САОР имеет высший приоритет и поэтому принимается, что конкурирующие действия не мешают ручному пуску САОР.

Оценка вероятностей — вероятность P_d оценивается по средней кривой графика ASEP (см. рис. 2) в зависимости от промежутка времени T_d , вероятность P_a оценивается по таблицам THERP. Результат оценки представлен в табл. 2.

Следует отметить, что при консервативном подходе или недостатке данных действиями персонала в первые 30 мин после начала аварии зачастую пренебрегают. Согласно оценкам, используемым методами ASEP и THERP, даже при консервативном использовании верхней кривой вероятность ошибки персонала равна 1 только

первые 10 мин, после чего она снижается и достигает 10^{-1} через 20 мин и 10^{-2} через 30 мин.

В результате анализа данного действия в контексте разных исходных событий определены четыре специфических действия оператора и для каждого действия рассчитана соответствующая вероятность ошибки. Данный пример показывает, что факторы, влияющие на выполнение действия, различаются для разных аварийных сценариев. В данном случае промежуток времени на диагностику, принятие решения и выполнение действия почти в 3 раза больше при средней аварии с потерей теплоносителя, чем при крупной, что обуславливает меньшую вероятность ошибки.

Перевод насосов САОР на резервный источник охлаждения. Насосы САОР охлаждаются водой промежуточного контура. При потере данного источника возникает угроза отказа насосов САОР, и оперативный персонал должен перевести охлаждение насосов на резервный источник от бака ремонтного расхолаживания.

Критерии успешности: условия, требующие выполнения действия, — наличие признаков отказа промежуточного контура; условия окончания временного промежутка — при перегреве насосы САОР должны быть отключены вручную оператором и могут быть включены вновь после подключения резервного источника охлаждения. Таким образом, временной промежуток на выполнение действия состоит из времени до отключения насосов и максимального времени, на которое они могут быть отключены. Для аварий с потерей теплоносителя это время до перегрева реактора, для аварий с сохранением целостности КМПЦ — время до начала разогрева реактора; цель действия — обеспечить охлаждение насосов; предпринимаемые действия — определить отказ промежуточного контура, открыть арматуру подачи воды от резерв-

Т а б л и ц а 2. Оценка вероятности ошибки при выполнении действия «ручной пуск САОР при аварии с потерей теплоносителя»

Действие — пуск САОР	$M(P_d)$	$E_f(P_d)$	$M(P_a)$	$E_f(P_a)$	$M(P)$	$p_{0,05}(P)$	$p_{0,95}(P)$
Быстродействующая САОР, крупная течь САОР длительного расхолаживания, крупная течь	$1,57 \cdot 10^{-1}$	3	$3,75 \cdot 10^{-3}$	3	$1,61 \cdot 10^{-1}$	$4,43 \cdot 10^{-2}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$
Быстродействующая САОР, средняя течь САОР длительного расхолаживания, средняя течь	$6,43 \cdot 10^{-3}$	5	$3,75 \cdot 10^{-3}$	3	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$
	$4,05 \cdot 10^{-3}$	5	$3,75 \cdot 10^{-3}$	3	$7,80 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$

ного источника на насосы САОР, закрыть арматуру подачи воды промежуточного контура; исполнитель действия — оператор щита водного хозяйства; место выполнения действия — щит водного хозяйства; используемые процедуры — инструкция по ликвидации аварийных ситуаций.

Временные критерии успешности: принимается, что насосы САОР сохранят свою работоспособность (с учетом возможности переключения) в течение 30 мин после потери охлаждения. Если потеря промежуточного контура является исходным событием, запас времени после отключения насосов принят равным 1 ч 10 мин. Если потеря охлаждения насосов САОР накладывается на другое исходное событие, то запас времени для крупных аварий с потерей теплоносителя составляет 12 мин, для средних — 27 мин, для малых течей и аварий без потери целостности КМПЦ — 1 ч 10 мин. Указанные оценки основаны на результатах анализа аварий. Оцененное время на выполнение действия T_a составляет 10 мин. Соответственно время T_d составляет от 30 до 90 мин в зависимости от исходного события. Оценка времени представлена в табл. 3.

Таблица 3. Оценка времени на выполнение действия «перевод насосов САОР на резервный источник охлаждения», мин

Исходное событие	T_m	T_a	T_d
Потеря промежуточного контура	100	10	90
Крупная авария с потерей теплоносителя	40	10	30
Средняя авария с потерей теплоносителя	60	10	50
Авария без разрыва КМПЦ	100	10	90

Граничные условия: если потеря охлаждения насосов САОР является исходным событием, принимается средний уровень стресса, вни-

мание оператора сосредоточено только на этом событии, предусмотренном аварийной инструкцией. В случае наложения потери охлаждения на другое исходное событие уровень стресса высок, персонал занят действиями по ликвидации аварии в зависимости от исходного события и, вероятно, не сразу обнаружит потерю охлаждения насосов.

Оценка вероятностей — вероятность P_d в случае исходного события — потери охлаждения насосов САОР оценивается по средней кривой ASEP, для других исходных событий с наложением данного отказа — по верхней кривой ASEP (см. рис. 2), что отражает влияние конкурирующих действий и стресса, вероятность P_a оценивается по таблицам THERP. Результат оценки представлен в табл. 4.

Данный пример в дополнение к предыдущему показывает зависимость вероятности ошибки не только от доступного времени, но и от других факторов. Так, для событий с одинаковым временным промежутком оценены разные вероятности ошибок, вызванные появлением нескольких событий.

Заключение. Комбинация методов ASEP и THERP позволяет оценить вероятность ошибок операторов на различных стадиях действия: распознавание события, принятие решения и выполнение. Анализ ошибок в контексте путей развития аварии позволяет получить более точные оценки вероятностей ошибок, что делает модель вероятностного анализа безопасности более адекватной, а также выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на действия операторов. Применение данной методики возможно в областях, где оператор играет важную роль в обеспечении безопасности: в ядерной энергетике, нефтяной и химической промышленности, в транспортном секторе.

Данное исследование профинансировано Научным советом Литвы (договор № АТЕ-10/2010).

Таблица 4. Оценка вероятности ошибки при выполнении действия «перевод насосов САОР на резервный источник охлаждения»

Исходное событие	$M(P_d)$	$E_f(P_d)$	$M(P_a)$	$E_f(P_a)$	$M(P)$	$p_{0,05}(P)$	$p_{0,95}(P)$
Потеря промежуточного контура	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	$2,54 \cdot 10^{-4}$	10	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$
Крупная авария с потерей теплоносителя	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	$1,32 \cdot 10^{-2}$	5	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$4,31 \cdot 10^{-2}$
Средняя авария с потерей теплоносителя	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	$5,92 \cdot 10^{-3}$	5	$7,17 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
Аварии без разрыва КМПЦ	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	$4,61 \cdot 10^{-3}$	5	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forester J., Kolaczowski A. e.a. Evaluation of Human Reliability Analysis Methods Against Good Practices. Final Report. NUREG-1842, 2006.

2. Swain A. Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure. NUREG/CR-4772, 1987.
3. Swain A., Guttmann H. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report. NUREG/CR-1278, 1983.

Поступила в Редакцию 23.09.10

УДК 621.039.573

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ УСТРОЙСТВ В ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ РЕАКТОРА СМ

Топорова В.Г., Петелин А.Л. (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)

В настоящей статье приведен расчетный и экспериментальный расход теплоносителя, который возможен в облучательных каналах отражателя реактора СМ при перепаде давления 5—42 кПа, а также соответствующая тепловая нагрузка и температура элементов высокоэнергонапряженных мишеней штатной геометрии, например, для наработки трансурановых элементов.

Картограмма активной зоны и каналов отражателя реактора СМ показана на рис. 1. Кладка бериллиевого отражателя СМ выполнена из 44 блоков различной конфигурации, образующих цилиндр диаметром около 1200 мм с внутренней полостью квадратного сечения 422×422 мм для размещения активной зоны. В центре активной зоны находится нейтронная

ловушка — замедляющая нейтроны полость с максимальной плотностью потока $E > 0,1$ МэВ $1,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, $E < 0,465$ эВ $1,7 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, в которой установлен сепаратор из 27 трубок внутренним диаметром 12,8 мм. В них размещают мишени для накопления изотопов далеких трансурановых элементов, а также получают радионуклидные препараты высокой удельной активности. Для этих же целей используют и каналы отражателя Д-8, -10. Активная зона, мишени в центральном блоке и каналах Д-8, -10 охлаждаются нисходящим потоком теплоносителя, имеющим перепад давления 500—800 кПа, остальные 28 экспериментальных каналов отражателя — восходящим потоком. После реконструкции 1990—1992 гг. перепад давления на отражателе составлял 42 кПа и формировался облучательными устройствами в ближних высокопоточных каналах и пробками в периферийных низкопоточных каналах, не востребованных для облучения.

В 1994 г. пробки из периферийных каналов были удалены, перепад давления на отражателе снизился до 5 кПа. Тем не менее расчеты показали, что расход теплоносителя на каналы отражателя был достаточен для охлаждения экспериментальных устройств. В разное время работы реактора СМ в зависимости от конкретной картограммы перепад давления составлял от 4 до 42 кПа, например, в 2010—2011 гг. он был равен 10 кПа и формировался облучательными устройствами 23 из 28 загруженных каналов.

Допустимая загрузка стартового материала в мишень лимитируется возможностями ее охлаждения, которые зависят от конструктивных особенностей ячейки отражателя, облучательного устройства и мишени. На рис. 2 пока-

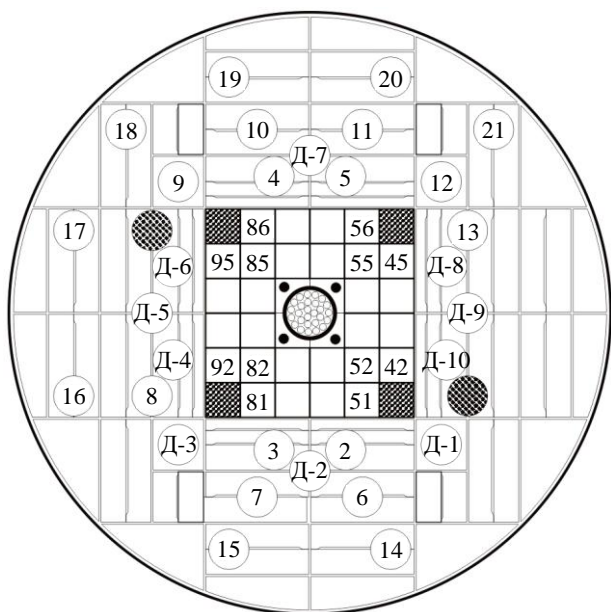


Рис. 1. Картограмма реактора СМ: ■, ● — рабочие органы системы управления и защиты; ④ — канал для облучения; 81 — ячейка активной зоны