

Об объёме и составе расчётно-экспериментальных обследований сейсмостойкости оборудования АЭС

- Емельянова А. Д., ОАО “Атомтехэнерго”
- Казновский А. П., ОАО “Атомтехэнерго”
- Казновский П. С., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Касьянов К. Г., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Рясный С. И.¹, доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”

При расчётно-экспериментальном обосновании сейсмостойкости систем и элементов каждого энергоблока АЭС в соответствии с действующими нормативными документами необходимо экспериментально изучать и учитывать в расчётах собственные динамические характеристики нескольких тысяч единиц оборудования в условиях фактического состояния. Рассмотрены возможности сокращения состава обследуемого оборудования при проведении визуального осмотра, динамических испытаний и расчётного анализа сейсмостойкости оборудования. Предложены процедуры по оптимизации объёмов расчётно-экспериментальных исследований сейсмостойкости.

Ключевые слова: сейсмостойкость, оборудование АЭС, динамические характеристики, резонанс, собственные частоты, декременты колебаний.

Для расчётной оценки сейсмостойкости систем и элементов (оборудования) АЭС нормативным документом [1] регламентируется линейно-спектральный метод расчёта. Если первая собственная частота колебаний больше 20 Гц, допускается выполнять расчёт более простым статическим методом, который заключается в приведении сейсмических нагрузок к статической нагрузке с помощью эмпирических коэффициентов. Ускорения, полученные по спектру ответа, при использовании статического метода умножаются на коэффициент 1,3 для частоты в диапазоне 20 – 33 Гц и на коэффициент 1,0 для частоты больше 33 Гц [1]. Результаты статистических исследований накопленного банка экспериментальных данных, полученных на многочисленных энергоблоках АЭС, показывают, что около 54% оборудования имеет низшую собственную частоту меньше 20 Гц (рис. 1), его расчёт на сейсмостойкость необходимо выполнять с использованием линейно-спектрального метода.

Линейно-спектральный метод предусматривает учёт сейсмического воздействия на оборудование в виде спектральной кривой (позтажного спектра ответа здания на грунтовую акселерограмму) зависимости ускорения от частоты. Сейсмическое воздействие на оборудование задаётся также с учётом этажной отметки размещения оборудования в зданиях АЭС и значений относительного демпфирования (декрементов колебаний). Таким образом, уровень задаваемого на оборудование расчётного сейсмического воздействия напрямую

зависит от его собственных динамических характеристик, которые обусловлены условиями монтажа, раскрепления, трубопроводной обвязки и другими факторами.

Влияние монтажа, раскрепления и обвязки на динамическое поведение и стойкость изделия к сейсмическим воздействиям в чисто расчётных (не основанных на дополнительных экспериментальных данных) методах имитируется заданием граничных условий на основе данных, имеющих в проекте. Однако в ходе выполнения монтажных работ неизбежны отклонения от проекта, связанные с определёнными допусками (отклонения от трассировки, люфты в опорных конструкциях, замены опорных элементов и др.), а также с качеством выполнения работ. Поэтому проектное мо-

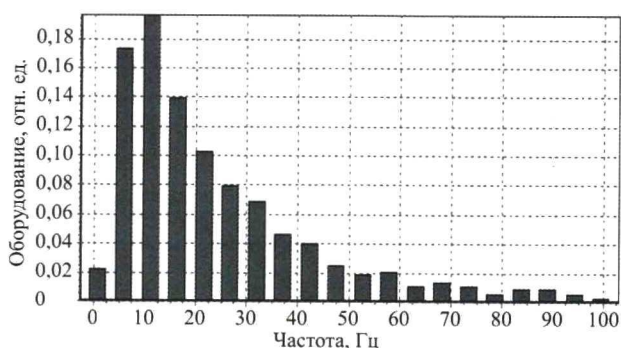


Рис. 1. Распределение значений собственных частот по всем направлениям в диапазоне 0 – 100 Гц:

ось ординат – отношение количества единиц оборудования с данной собственной частотой к общему количеству обследованного оборудования в относительных единицах

¹ Рясный Сергей Иванович: gyasny@atech.ru



Рис. 2. Пример расчётных моделей идентичных, но по-разному обвязанных клапанов:

а – первая форма колебаний на частоте 4,8 Гц; б – то же на частоте 7,5 Гц

делирование технологических систем и элементов АЭС имеет ограниченную степень достоверности, что зачастую приводит к существенным, в том числе недопустимым, погрешностям в расчётном (проектном) определении динамических характеристик и сейсмостойкости изделий даже при высокой степени детализации граничных условий проектных расчётных моделей.

В результате многочисленных натурных исследований сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов (оборудования) энергоблоков АЭС применяемым авторами расчётно-экспериментальным методом [2 – 4] в реальных условиях монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки установлено, что даже в пределах одного и того же энергоблока АЭС и даже одной и той же высотной отметки имеются многочисленные примеры существенного различия между экспериментальными значениями собственных динамических характеристик, определённых для разных единиц совершенно однотипного оборудования и, как следствие, различия между их сейсмостойкостью [5].

Например, при расчётно-экспериментальном обосновании сейсмостойкости двух абсолютно идентичных, но по-разному обвязанных запорных сильфонных клапанов системы байпасной очистки воды первого контура энергоблока № 4 Калининской АЭС полученные экспериментальные значения низших частот колебаний составили 4,8 и 7,5 Гц (рис. 2).

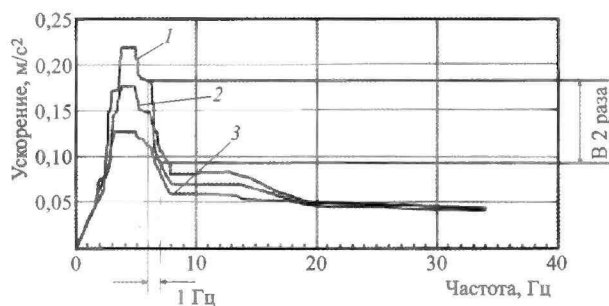


Рис. 3. Пример поэтажного спектра ответа для помещения резервной дизельной электростанции на отметке –4,2 м:

1, 2, 3 – декремент затухания колебаний соответственно 2, 3 и 5%

В связи с ярко выраженным резонансным характером сейсмических воздействий расчётные нагрузки, задаваемые на оборудование, в зависимости от значений его собственных динамических характеристик могут отличаться на один – два порядка. На рис. 3 изображён поэтажный спектр ответа (воздействия на оборудование), показывающий, что при изменении частоты сейсмического воздействия всего на 1,0 Гц возможно увеличение нагрузки на оборудование в 2 раза.

Кроме того, даже абсолютно идентичное оборудование с совпадающими собственными динамическими характеристиками, установленное на энергоблоках одной серии, но спроектированных для различных площадок размещения АЭС, в случае землетрясения может воспринимать различные нагрузки. На рис. 4 представлены два поэтажных спектра ответа на сейсмические воздействия для энергоблоков одной серии (ВВЭР-1000) двух разных АЭС (энергоблоки № 4 Калининской и № 2 Ростовской АЭС) на одной и той же отметке в месте установки бака запаса топлива резервной дизельной электростанции (РДЭС) для одного и того же значения декремента затухания. Как видно из графиков, для одной и той же собственной частоты бака 7,2 Гц нагрузки от сейсмических воздействий на энергоблоке Ростовской АЭС в 2,5 раза больше, чем на энергоблоке Калининской АЭС. Следует отметить, что несмотря на различия между спектрами ответа проектные решения в части условий раскрепления и трубопроводной обвязки бака запаса топлива абсолютно идентичны для обеих АЭС.

При проектных обоснованиях сейсмостойкости нагрузки на системы и элементы АЭС (оборудование) от сейсмических воздействий зачастую задаются по консервативным обобщённым спектрам ответа, полученным в результате анализа многочисленных спектров ответа для различных энергоблоков АЭС. Однако предложенные нормативным документом [1] в 1986 г., а также другие обобщённые спектры ответов, используемые при проектных расчётах оборудования, на сегодняшний день теряют свою актуальность в связи с накоплением многочисленных новых данных, полученных при проектировании новых энергоблоков и стремительном совершенствовании инструмен-

тальных и программных возможностей расчётов строительных конструкций. Известны случаи, когда ускорения на спектрах ответа, рассчитанных для реальной АЭС с учётом размещения площадки строительства, значительно (на 20 – 30%) превышали значения ускорений широко используемых обобщённых спектров.

Тем не менее проектные (расчётные) оценки сейсмостойкости необходимы для того, чтобы избежать принципиальных ошибок на стадии проектирования и изготовления нового оборудования, технологических систем и трубопроводов, их опорных конструкций.

Всё сказанное подтверждает необходимость экспериментального определения собственных динамических характеристик важного для безопасности оборудования АЭС с последующим уточняющим расчётным анализом его сейсмостойкости, как это регламентируется нормативным документом НП-064-05 [6] и новым отраслевым методическим документом МТ 1.2.2.04.0069-2012 [7], разработанным в ОАО “Атомтехэнерго” и введённым в действие ОАО “Концерн Росэнергоатом” [4, 8]. При этом анализ необходимо выполнять, основываясь на данных о сейсмических воздействиях на оборудование (спектрах ответов) для каждого энергоблока АЭС индивидуально.

Расчётно-экспериментальное обоснование сейсмостойкости оборудования включает:

- составление перечней обследуемого оборудования;

- проверку соответствия смонтированного оборудования требованиям к монтажу и проектной документации;

- экспериментальное определение собственных динамических характеристик оборудования в реальных условиях монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки;

- определение нагрузок на оборудование по имеющимся спектрам ответов от сейсмических воздействий для зданий и сооружений конкретного энергоблока;

- анализ проектных нагрузок от сейсмических воздействий на оборудование;

- выбор критериев сейсмостойкости оборудования;

- расчётное обоснование сейсмостойкости типопредставителей оборудования (уточнение проектных расчётов) по результатам динамических испытаний;

- разработку рекомендаций по обеспечению сейсмостойкости выявленных несейсмостойких единиц.

В необходимый набор исходных данных для расчётов входят результаты динамических испытаний оборудования, рабочие чертежи и конструктивные схемы оборудования, спектры ответов, по-

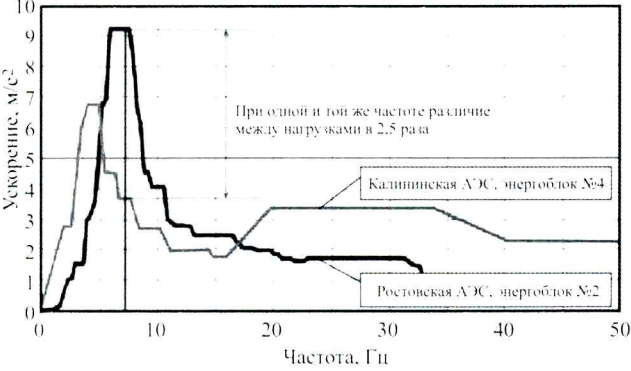


Рис. 4. Поэтажные спектры ответа (воздействия на оборудование) в месте установки бака запаса топлива РДЭС для энергоблоков одной серии на различных площадках размещения АЭС

лученные для зданий с рассматриваемым оборудованием.

После анализа исходных данных разрабатываются (уточняются) расчётные модели оборудования, представляющие собой стержневые или оболочечные конечно-элементные модели с массой, распределённой по элементам. При создании моделей учитываются реальные условия раскрепления и монтажа оборудования и его расположение в системе трубопроводов. До начала вычислений расчётные модели корректируются в соответствии с результатами динамических испытаний, что позволяет уточнить значения действующих на оборудование нагрузок от сейсмических воздействий. По результатам расчётов выполняется проверка критериев сейсмостойкости. Основными критериями являются прочность трубопроводов в критических точках, прочность узлов крепления оборудования к трубопроводам и опорным конструкциям, прочность опорных элементов и др.

Выполнение всех описанных мероприятий при обследовании по полному перечню важного для безопасности оборудования энергоблока АЭС – весьма трудоёмкая задача. Как правило, на каждом энергоблоке АЭС необходимо анализировать сейсмостойкость 2 – 3 тыс. единиц оборудования, относящегося только к первой категории сейсмостойкости. В связи с этим возникает актуальная задача оптимизации (минимизации) перечней обследуемого оборудования и объёмов расчётно-экспериментальных исследований сейсмостойкости.

При расчётно-экспериментальном анализе сейсмостойкости оборудования энергоблоков АЭС, находящихся на территории России, достаточно ограничиться оборудованием первой категории сейсмостойкости, для которого необходимо подтверждать сейсмостойкость при максимальном расчётном землетрясении (МРЗ), интенсивность которого для всех российских АЭС в соответствии с нормами [6] принимается равной 7 баллам по шкале MSK-64. Для оборудования российских

АЭС второй категории сейсмостойкости требуется подтверждение сейсмостойкости только при проектном землетрясении (ПЗ) интенсивностью 6 баллов по шкале MSK-64. Для АЭС, строящихся по российским проектам за рубежом в сейсмоопасных регионах (Индия, Египет, Иран, Болгария и др.), необходимо подтверждать расчётно-экспериментальным методом сейсмостойкость оборудования как первой, так и второй категории сейсмостойкости.

В настоящее время перечни оборудования для расчётно-экспериментальной проверки сейсмостойкости разрабатываются на основе объектных перечней, классификаторов по категориям сейсмостойкости и группам безопасности, предоставляемых проектной организацией или АЭС. Из составляемых перечней, как правило, исключаются:

вспомогательное малогабаритное оборудование, не оказывающее влияния на динамическое поведение анализируемых систем (манометры, датчики и др.), так как его собственные динамические характеристики не попадают в область сейсмических резонансов;

вспомогательная малогабаритная трубопроводная арматура с ручным приводом, так же не оказывающая существенного влияния на динамическое поведение анализируемых систем, ввиду малой сосредоточенной массы оборудования (центр масс располагается на оси трубопровода) и без вынесенных элементов;

крупногабаритное оборудование (корпус реактора, сосуды системы аварийного охлаждения зоны – САОЗ, парогенераторы и др.), сейсмостойкость которого рассматривается на стадии проектирования во взаимосвязи со строительными конструкциями, поскольку данное оборудование при проведении проектных расчётов включается в расчётные модели зданий и все возможные нагрузки учитываются с необходимыми запасами;

автономное электротехническое оборудование (без внешних связей, влияющих на его динамическое поведение), сейсмостойкость которого изучалась в лабораторных условиях на вибростендах или расчётно-экспериментальным методом при строгом воспроизведении реальных условий монтажа и раскрепления.

Результаты статистического анализа обследованного оборудования по собственным динамическим характеристикам не позволяют, к сожалению, выделить типы оборудования, для которого априори нет необходимости проводить испытания по определению собственных динамических характеристик. Это связано с тем, что практически для всех типов оборудования выявляются единицы с собственными частотами и декрементами колебаний в области сейсмических резонансов, т.е. исходя из накопленного на сегодняшний день экспериментального материала не представляется возможным надёжно определить динамические

характеристики оборудования без проведения испытаний.

В качестве эксперимента авторами был выполнен анализ параметров 180 единиц оборудования с экспериментально определёнными низшими собственными частотами колебаний более 20 Гц на двух энергоблоках одной серии с реакторами ВВЭР-1000 – энергоблоке № 2 Ростовской АЭС и энергоблоке № 4 Калининской АЭС. Анализировались следующие параметры: тип оборудования, система, вид опорных конструкций, масса, габариты и др. Анализ показал, что близкими динамическими характеристиками (частотами и декрементами) обладают только единицы, абсолютно идентичные по анализируемым параметрам. Как правило, – это однотипное оборудование одного производителя с идентичными условиями закрепления, незначительно различающееся по массе и габаритам. Таким образом, от испытаний можно отказаться только в тех редких случаях, когда абсолютно такое же (того же типа и производителя) оборудование в тех же проектных условиях закрепления было ранее испытано на других энергоблоках. При этом необходимо удостовериться в соответствии оборудования проекту в части монтажа и раскрепления.

По результатам анализа были выявлены отдельные единицы одинакового оборудования на рассматриваемых разных энергоблоках с близкими значениями собственных частот и декрементов колебаний в области частот более 20 Гц, от испытаний которого можно будет в дальнейшем отказаться: спринклерные насосы и насосы аварийного ввода бора, вентиляционные агрегаты ВДНА-нж-15с, гермоклапаны систем вентиляции, насосы промежуточного контура системы аварийного охлаждения (активной) зоны, водяные, масляные и топливные насосы РДЭС, насосы пожаротушения, быстродействующие запорные отсечные клапаны (БЗОК), пластинчатые теплообменники, установленные непосредственно на бетонном основании без промежуточных опорных конструкций.

Помимо оптимизации (минимизации) общего перечня оборудования, подлежащего расчётно-экспериментальной проверке, возникает задача формирования перечня и выбора типопредставителей оборудования, подлежащих уточняющему расчётному анализу сейсмостойкости по результатам проведённых динамических испытаний, сейсмостойкость которых будет однозначно гарантировать сейсмостойкость всего оборудования из общего перечня.

В случае одинакового оборудования со схожими условиями раскрепления и трубопроводной обвязки задача выбора типопредставителей для расчёта не представляет большой сложности и сводится к выбору единицы с наихудшими динамическими характеристиками по результатам ди-

намических испытаний и наихудшему с точки зрения воспринимаемых нагрузок от сейсмических воздействий расположению в здании АЭС. К такому оборудованию можно отнести: трубопроводную арматуру с собственными опорами, насосы, вентиляционные агрегаты, пластинчатые теплообменники, автономные кондиционеры, баки и др.

Наибольшую сложность представляет обоснование выбора типопредставителей для расчёта сейсмостойкости одинакового оборудования, но различающегося условиями раскрепления и трубопроводной обвязки. Например, собственные динамические характеристики трубопроводной арматуры без собственных опор и, следовательно, нагрузки от сейсмических воздействий, будут обусловлены прежде всего конфигурацией и условиями закрепления стыкуемых трубопроводов. То же относится и к оборудованию, устанавливаемому на промежуточных металлических опорных конструкциях, к участкам трубопроводов, теплообменному оборудованию, взаимосвязанному механически со вспомогательным оборудованием и трубопроводами, и др. Известны случаи, когда конфигурация и условия закрепления стыкуемых трубопроводов были различными для 30 и более единиц абсолютно одинакового оборудования. Как следствие, разброс экспериментально определённых низших собственных частот колебаний такого оборудования охватывал всю область сейсмических резонансов на спектрах ответа. В настоящее время типопредставители для расчёта в подобных случаях выбираются исходя из результатов динамических испытаний и инженерного опыта расчётчиков.

Для упрощения задачи выбора типопредставителей оборудования для расчётного анализа сейсмостойкости по результатам динамических испытаний необходима разработка объективных математических критериев выбора одного (или нескольких) типопредставителей из группы идентичных единиц оборудования с различными условиями закрепления и трубопроводной обвязки.

Анализ многочисленных спектров ответа для разных энергоблоков АЭС подтверждает, что нагрузка от сейсмических воздействий при низших собственных частотах колебаний оборудования выше 20 Гц слабо зависит от собственных динамических характеристик (см. рис. 3).

Вопрос выбора для расчёта типопредставителей оборудования из ряда идентичных перестаёт быть актуальным в следующих случаях:

когда в группе идентичных единиц с различными условиями закрепления и трубопроводной обвязки все представители имеют низшую частоту собственных колебаний выше 20 Гц, так как влияние на нагрузки собственных динамических характеристик минимально;

когда лишь одна единица из группы имеет низшую частоту собственных колебаний ниже 20 Гц, так как расчёт единственной “выпавшей” следует выполнять линейно-спектральным методом.

С целью дальнейшего усовершенствования и оптимизации расчётно-экспериментальных, основанных на результатах динамических испытаний, исследований сейсмостойкости энергоблоков АЭС авторами разрабатывается электронная база данных, которую планируется использовать для квалификации на сейсмические воздействия идентичного оборудования на необследованных и новых энергоблоках АЭС. База данных содержит универсальные квалификационные карты обследованных единиц оборудования, включающие полный набор параметров, получаемых в ходе исследования (тип оборудования, геометрические показатели, типы опорных конструкций и условия раскрепления, результаты динамических испытаний и расчётов и др.).

Использование базы данных позволит сократить объёмы расчётно-экспериментальных исследований сейсмостойкости из-за “отсева” ранее квалифицированного и включённого в базу данных строго идентичного оборудования на разных этапах обследования.

При этом речь ни в коем случае не идёт об установлении подобия с ранее испытанным и квалифицированным оборудованием, как это предлагается в практике зарубежных методик сейсмической квалификации, основанных на процедуре GIP (Generic Implementation Procedure), так как такой подход не представляется обоснованным.

На динамические испытания всех единиц из составленного общего перечня оборудования первой категории сейсмостойкости (порядка 2 – 3 тыс. единиц) обычно требуется около 8 недель, на обработку и интерпретацию результатов испытаний (определение собственных частот и декрементов колебаний) уходит ещё 3 – 4 недели. Необходимые расчёты сейсмостойкости обычно выбираемых 200 – 300 типопредставителей оборудования выполняются в течение 6 – 8 мес. Таким образом, на полное расчётно-экспериментальное обследование систем и элементов одного энергоблока АЭС требуется около одного года.

Выводы

С целью существенного сокращения общего объёма и времени обследования (до 6 – 8 мес на один энергоблок) предлагается следующее:

формировать первоначальные перечни для проверки сейсмостойкости, содержащие всё без исключения оборудование первой категории сейсмостойкости для российских АЭС и оборудование первой и второй категории сейсмостойкости для АЭС, строящихся по российским проектам за рубежом;

выполнять обход и визуальный осмотр оборудования в соответствии с первоначальными перечнями оборудования, в процессе которого проверять соответствие проектным требованиям по монтажу и раскреплению оборудования;

на основе обхода и визуального осмотра оборудования формировать перечни оборудования, подлежащего испытаниям в реальных условиях раскрепления и трубопроводной обвязки. На данной стадии можно будет сделать "отсев" ранее испытанного и квалифицированного на сейсмостойкость одинакового оборудования в соответствии с электронной базой данных;

по результатам испытаний формировать перечни для заключительной расчётной проверки. На данной стадии также можно будет сделать "отсев" оборудования, ранее рассчитанного на более высокие нагрузки от сейсмических воздействий в соответствии с электронной базой данных.

Список литературы

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Сейсмическая безопасность атомных станций / Ананьев А. Н., Казновский П. С., Казновский С. П., Лебе-

дев В. И., Чеченов Х. Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.

3. Пат. 2284553 (РФ). Способ аттестации многоэлементной системы на сейсмостойкость / Казновский С. П., Казновский П. С., Казновский А. С., Мищенко В. Ф., Пискарев В. В. Оpubл. в Б. И., 2006, № 27.
4. Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа / Казновский А. П., Казновский П. С., Рясный С. И., Сааков Э. С. – Электрические станции, 2012, № 12.
5. Обоснование сейсмостойкости технологического оборудования энергоблока № 4 Калининской АЭС методом динамических испытаний / Казновский А. П., Казновский П. С., Казновский П. С., Казьянов К. Г., Рясный С. И. – В кн.: Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции "Ввод АЭС в эксплуатацию". М.: Атомтехэнерго, 2012.
6. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. – Ядерная и радиационная безопасность, 2006, № 3 (40).
7. МТ 1.2.2.04.0069-2012. Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС важных для безопасности. М.: ОАО "Концерн Росэнергоатом", 2012.
8. Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС / Казновский А. П., Казновский П. С., Рясный С. И., Сааков Э. С. – Электрические станции, 2012, № 9.

Уважаемые читатели журнала «Электрические станции»!

Редакция журнала приступила к выпуску годовых сборников журнала на CD!

На экране своего компьютера Вы увидите электронную версию журнала, в точности соответствующую печатному оригиналу. Удобная система закладок, тематический указатель и рубрикатор позволят Вам быстро находить нужную информацию.

Годовой сборник журнала на CD – это САМЫЙ УДОБНЫЙ способ хранения информации!

Требования к операционной системе:
IBM-совместимый компьютер на базе процессора Pentium; процессор 98 и выше; Microsoft Windows 98 и выше; 16 Мб RAM (рекомендуется 32 Мб); 20 Мб свободного места на жестком диске.

Заплатив 472 руб. (в том числе НДС и почтовые расходы). Вы уже сейчас можете приобрести годовые сборники журнала на CD, начиная с 2001 г. Направьте в редакцию (по почте, факсу или E-mail) гарантийное письмо-заявку с указанием платежных реквизитов и точного почтового адреса. Вам будет выставлен счет, после оплаты которого мы вышлем в Ваш адрес CD.

Адрес редакции: 115280, Москва, 3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1
Тел/факс: (495) 234-74-17
E-mail: el-stantsii@rambler.ru

