

*В.Г. Толубенко, ст. преподаватель, УГЗУ,
С.А. Неминуций, преподаватель, УГЗУ,
Ю.И. Калябин, преподаватель, УГЗУ*

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ АЭС УКРАИНЫ

(представлено доктором техн. наук Е.В. Бодянским)

На основе проведенной оценки уровня обеспечения безопасности людей при пожаре обоснован выбор проекта системы противодымной защиты зоны свободного режима реакторного отделения АЭС.

Постановка проблемы. Согласно требованиям действующих нормативно-технических документов для АЭС Украины [1], противодымную защиту (ПДЗ) зданий (помещений), не имеющих ограничений по связи с окружающей средой, следует выполнять, руководствуясь требованиями [2]. Требование п. 5.2 [2] наличия системы ПДЗ коридоров производственных зданий повышенной этажности, каковым и является здание реакторного отделения (РО) АЭС, при строительстве энергоблоков не было выполнено. При эксплуатации энергоблоков АЭС реализация требований нормативных документов по устройству традиционной системы ПДЗ (дымоудаления) коридоров является невозможной. Подобный факт создает возможные препятствия для безопасной эвакуации людей в условиях возникновения пожара в здании.

Анализ последних достижений и публикаций. Настоящая работа является продолжением работы [3], в которой представлен анализ существующей системы противопожарной защиты, обеспечивающей безопасность людей при пожаре в зоне свободного режима (ЗСР) РО АЭС Украины. В частности было показано, что целесообразность выбора в условиях действующих энергоблоков альтернативных вариантов ПДЗ путей эвакуации (коридоров), обеспечивающих эффективную защиту людей в течение расчетного времени эвакуации, требует расчетного обоснования по определению уровня обеспечения безопасности людей при пожаре в соответствии с действующим стандартом [4].

Существующая разработка устройства дымоподавления, предложенная ЗАО «НПО Укрсовпроект» [5], основанная на принципе абсорбции частиц дыма из воздуха коридоров за счет разрежения, создаваемого в установке падающим потоком воды из специальных насадков-распылителей (водо-воздушный эжектор), имеет ряд суще-

ственных недостатков, как экономического, так и технического характера, что не гарантирует приемлемый уровень обеспечения безопасности людей на путях эвакуации. К основным недостаткам данного устройства следует отнести невозможность нейтрализации токсических продуктов горения, образующих критические для жизни и здоровья людей концентрации уже на начальной стадии пожара, поскольку вода не является универсальным абсорбентом, необходимость очистки воды перед подачей на установку, а также ее дальнейшего удаления с использованием дополнительных систем водочистки и канализации, что в условиях действующих энергоблоков приводит к значительным экономическим затратам, сложность размещения установки в пределах поэтажного коридора без нарушения нормативных требований к конструктивному исполнению путей эвакуации.

Таким образом, на сегодня неразрешенным остается вопрос по защите людей на начальных этапах эвакуации (при движении из помещений и в коридорах до выхода в незадымляемую лестничную клетку) от действия опасных факторов пожара (ОФП) в ЗСР РО при различных условиях эксплуатации объекта.

Постановка задачи и ее решение. Целью настоящей работы является оценка уровня обеспечения безопасности людей при пожаре в здании ЗСР РО АЭС с целью дальнейшей выработки оптимальных и эффективных решений по приведению системы ПДЗ путей эвакуации в соответствии с требованиями действующих стандартов и норм по пожарной безопасности.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить параметры эвакуации людей из помещений ЗСР РО для различных условий эксплуатации объекта;
- оценить параметры критической продолжительности пожара в помещениях ЗСР РО на различных этапах эвакуации людей;
- оценить уровень обеспечения безопасности людей при пожаре в ЗСР РО в соответствии с требованиями действующего стандарта [4];
- обосновать выбор проекта системы ПДЗ путей эвакуации ЗСР РО АЭС.

Оценка параметров и расчетного времени эвакуации людей из ЗСР РО проводилась по методике [4]. В расчетах весь путь эвакуации людей из здания разбивался на 3 этапа:

1-й этап — эвакуация людей из помещений, в которых они находятся — параметры эвакуации людей на 1-м этапе являются исходными для определения значений параметров эвакуации людей на всех последующих этапах, они также определяют безопасность людей в помещении в случае возникновения в нем пожара;

2-й этап — эвакуация людей с этажа пожара в незадымляемую лестничную клетку, где будет обеспечена их безопасность — параметры эвакуации людей на 2-м этапе определяют безопасность людей на этаже пожара и возможность их безопасной эвакуации в незадымляемую лестничную клетку;

3-й этап — эвакуация людей из здания — параметры эвакуации людей из здания определяют безопасность людей на отм. 0.000 м в случае возникновения пожара на этаже, а также на всех этажах, расположенных выше этажа пожара, в случае возможности выхода продуктов горения в лестничную клетку или лестничный холл 1-го этажа.

Фактическое время эвакуации людей из здания определялось по формуле

$$\tau_{\text{ф}} = \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{н.э}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{р}}$ — расчетное время эвакуации людей, определяемое по методике [4], как сумма времени эвакуации людей на различных участках; $\tau_{\text{н.э}}$ — интервал времени от возникновения пожара до начала эвакуации людей.

Обобщенные данные по значениям расчетного времени эвакуации людей из ЗСР РО на различных этапах эвакуации, определенные по формуле (1), с учетом возможности слияния людских потоков на отдельных участках представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Расчетное время эвакуации людей из ЗСР РО АЭС

Отметка, м	Количество людей	Время эвакуации, мин		
		1 этап	2 этап	3 этап
– 4.200	8	0,12	0,64	1,02
0.000	9	0,21	—	0,59
3.600	2	0,03	0,66	0,85
6.600	15	0,25	0,59	0,86
13.200	15	0,24	0,74	1,83
16.800	6	0,21	0,76	1,32
20.400	11	0,24	0,77	1,83
24.600	17	0,24	0,89	1,94
28.800	15	0,24	0,66	1,94
33.600	6	0,45	0,74	1,79
41.400	15	0,4	0,69	1,97

Представленные в табл. 1 расчеты выполнены для условий пребывания в ЗСР РО максимально возможного количества людей (119 человек) при проведении планово-предупредительного ремонта.

Проведенные расчеты фактического времени эвакуации людей

из ЗСР РО АЭС показали, что расчетное время эвакуации людей с этажа пожара не превышает 1-й минуты, а расчетное время эвакуации всего обслуживающего персонала из здания не превышает 2-х минут.

Расчет необходимого времени эвакуации $\tau_{нб}$ производился для наиболее опасного варианта развития пожара, характеризующегося наибольшим темпом нарастания ОФП в рассматриваемом помещении. Сначала рассчитывались значения критической продолжительности пожара ($\tau_{кр}$) по условию достижения каждым из ОФП предельно допустимых значений в зоне пребывания людей (рабочей зоне) для различных этапов эвакуации по методике [4].

Из полученных в результате расчетов значений критической продолжительности пожара выбиралось минимальное из условия [4]

$$t_{кр} = \min \{ t_{кр}^T, t_{кр}^{П.В.}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{Т.Г.} \}, \quad (2)$$

где $t_{кр}^T$ — критическая продолжительность пожара по повышенной температуре, мин; $t_{кр}^{П.В.}$ — критическая продолжительность пожара по потере видимости, мин; $t_{кр}^{O_2}$ — критическая продолжительность пожара по пониженному содержанию кислорода, мин; $t_{кр}^{Т.Г.}$ — критическая продолжительность пожара по одному из токсических продуктов горения, мин.

Определение критической для людей продолжительности пожара проводилось отдельно для каждого этапа эвакуации. На *1-м этапе* эвакуации критическая продолжительность пожара определялась из условия достижения одним из ОФП в рассматриваемом помещении предельно допустимого значения.

На *2-м этапе* эвакуации критическая продолжительность пожара определялась из условия достижения одним из ОФП в поэтажном лестничном холле или коридоре предельно допустимого значения.

На *3-м этапе* эвакуации критическая продолжительность пожара определялась из условия достижения одним из ОФП вблизи места выхода из здания предельно допустимого значения.

С учетом конструктивного исполнения путей эвакуации здания и принятых инженерных решений по защите людей (устройство незадымляемых лестничных клеток с подпором воздуха при пожаре, наличие противопожарных перегородок в лестничных холлах, отделяющих пожароопасные кабельные помещения от мест выхода из лестничной клетки в холл) определение критической продолжительности пожара на 3-м этапе эвакуации не требуется, поскольку безопасность людей обеспечивается при их попадании в незадымляемую лестничную клетку.

Определение критической продолжительности пожара на 1-м этапе эвакуации проводилось для помещений, имеющих наибольшие значения расчетного времени эвакуации людей в соответствии с данными табл. 1.

Результаты расчетов критической продолжительности пожара для 1-го этапа эвакуации людей из ЗСР РО по вышеприведенной методике представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Критическая продолжительность пожара на 1-м этапе эвакуации людей из ЗСР РО

Параметры	Расчетные значения параметров для помещений	
	АВ 911/2	АЭ 1036/1
$t_{кр}^T, c$	202,88	91,94
$t_{кр}^{П.В.}, c$	98,44	42,86
$t_{кр}^O, c$	91,89	69,91
$t_{кр}^{ТГ}, c:$		
CO ₂	не представляет опасности	206,38
CO	133,29	57,58
HCl	85,60	37,37

Необходимое время эвакуации людей рассчитывалось как произведение критической для человека продолжительности пожара на коэффициент безопасности [4]

$$t_{нб} = 1,333 \cdot 10^{-2} \cdot t_{кр}. \quad (3)$$

Сравнивая результаты значений расчетного и необходимого времени эвакуации людей, представленные в таблицах 1 и 2, можно сделать вывод, что условие безопасности людей на 1-м этапе эвакуации из всех помещений ЗСР РО выполняется.

Наиболее опасная ситуация возникает на 2-м этапе эвакуации при движении людей по коридору в незадымляемую лестничную клетку, где будет обеспечена их безопасность.

Определение критической продолжительности пожара на 2-м этапе эвакуации людей проводим из условия возникновения пожара в одном из пожароопасных помещений, расположенных в месте выхода с этажа пожара [4]. С учетом пожарной нагрузки и наиболее вероятного источника зажигания такими помещениями являются кабельные помещения, которые имеют выход непосредственно в лестнично-лифтовые холлы на всех отметках здания. В этом случае создаются наихудшие условия для эвакуации людей из помещений наиболее удаленных от мест выхода с этажа в лестничную клетку. Кроме этого холлы лестниц имеют незначительную площадь, а, следовательно, и объем, что создает благоприятные условия для раннего их задымления.

При этом достаточно рассмотреть один вариант ситуации задымления лестнично-лифтового холла на этаже пожара с максимальным расчетным временем эвакуации людей, представленным в табл. 1. Это связано также с идентичностью расположения, площади и конструктивного исполнения лестнично-лифтовых холлов и кабельных помещений, имеющих выходы в них, на всех отметках здания РО.

При выполнении расчетов задаемся следующими условиями:

- дверь из кабельного помещения в холл принимается приоткрытой наполовину (в реальных условиях дверь полностью закрыта);
- продукты горения выходят через открытый дверной проем в лестничный холл;
- через открытый дверной проем при наличии в помещении разности температур внутреннего и наружного воздуха в условиях пожара происходит газообмен;
- через нижнюю часть проема наружный воздух (из холла) поступает в помещение, а через верхнюю часть газы удаляются наружу; граница между указанными потоками газов разделяется плоскостью равных давлений.

Для упрощения расчетов принимаем температуру газов в помещении в пределах высоты проема одинаковой и постоянной во времени. При этих условиях эпюра давлений, возникающих в дверном проеме, выглядит, как показано на рис. 1.

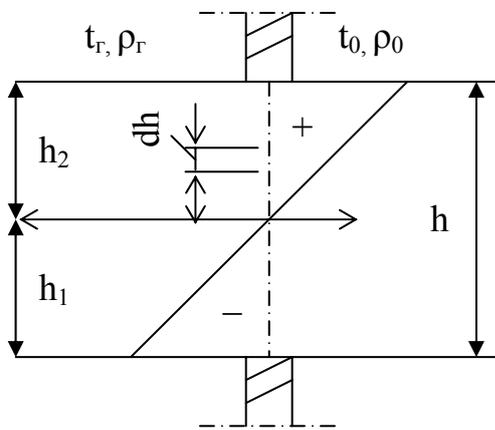


Рисунок 1 — Эпюра распределения давления газов в одном открытом проеме

На этом рисунке t_g, t_0 — температура газов и воздуха, $^{\circ}\text{C}$;
 h_1, h_2 — расстояние от плоскости равных давлений до нижнего и верхнего проемов, м;
 h — высота проема, м;
 ρ_g, ρ_0 — плотность газов в помещении и воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Определим массовый расход газов, удаляющихся через небольшую часть проема высотой dh

$$dG = \mu b dh \sqrt{2h_i^3 g (\rho_0 - \rho_g) \rho_g}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент расхода; b — ширина проема, м; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h_i — расстояние от плоскости равных давлений до заданного уровня dh в проеме, м.

Тогда полный расход удаляющихся газов будет равен

$$\int_0^G dG = \int_0^{h_2} \mu b d h \sqrt{2 h g (\rho_0 - \rho_r)} \cdot \rho_r . \quad (5)$$

Массовый расход газов, удаляющихся через верхнюю часть проема, в этом случае определяется по формуле [6]

$$G = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2 h_2^3 g (\rho_0 - \rho_r)} \rho_r . \quad (6)$$

Объемный расход газов, выходящих из горящего помещения

$$Q_r = G / \rho_r . \quad (7)$$

Массу и объем газов за расчетное время эвакуации людей в коридоре определяем по формулам

$$M_r = G \cdot \tau_p , \quad (8)$$

$$V_r = Q_r \cdot \tau_p . \quad (9)$$

Используя полученные значения массы и объема газов в коридоре с учетом изменения их плотности находим высоту незадымленной (нейтральной) зоны над полом коридора по формуле

$$h = H - V_r / S_k , \quad (10)$$

где H — высота коридора, м; S_k — площадь коридора, m^2 .

Расчеты по формулам (6 – 10), использованные для вычисления критической продолжительности пожара на 2-м этапе эвакуации людей (при движении по коридору в лестничную клетку), показали, что на момент расчетного времени эвакуации людей в незадымляемую лестничную клетку ОФП в коридоре не достигают критических для жизни и здоровья людей значений.

Полученные результаты позволяют определить вероятность эвакуации людей из ЗСР РО по требованию [4]. В данном случае с учетом специфики рассматриваемого объекта, где процесс вынужденной эвакуации происходит по внутренним лестничным клеткам, вероятность эвакуации $P_э$, будет вычисляться по формуле

$$P_э = 1 - (1 - P_{э.п.}), \quad (11)$$

где $P_{э.п.}$ — вероятность эвакуации по эвакуационным путям.

В нашем случае $P_{э.п.} = 0,999$, поскольку выполняется условие

$$\tau_p + \tau_{н.э} < \tau_{нб} . \quad (12)$$

Таким, образом, при соответствующем уровне надежности технических решений противопожарной защиты, обеспечивающих безопасность людей при пожаре (системы подпора воздуха, автоматической пожарной сигнализации, системы оповещения о пожаре и т.п.), который определяется вероятностью их эффективной работы ($P_{п.з.} \geq 0,99$), уровень обеспечения безопасности людей при пожаре в ЗСР РО АЭС Украины будет отвечать требуемому.

Разработка проекта системы ПДЗ путей эвакуации ЗСР РО осуществляется посредством совершенствования существующей на объекте системы приточной противодымной вентиляции с искусственным побуждением.

Представленными в работе расчетными оценками установлено, что безопасность людей при пожаре в ЗСР РО обеспечивается и при существующей системе ПДЗ путей эвакуации при условии обеспечения ее надежности с вероятностью эффективной работы $P_{п.з.} \geq 0,99$. Однако, с учетом нормативных требований [1, 2] возникает необходимость в ПДЗ поэтажных коридоров, расположенных на разных отметках здания.

В условиях действующего объекта реализация проекта системы дымоудаления из коридоров не представляется возможной и сопряжена с большими экономическими затратами. С этой целью предлагается осуществить вариант ПДЗ коридоров и лестнично-лифтовых холлов, используя возможности существующей системы подпора воздуха, не снижая при этом эффективность такой защиты. При работе блока на мощности в качестве компенсирующих мероприятий системы дымоудаления из коридоров ЗСР РО АЭС разработана система подпора воздуха в коридорах. Для предотвращения распространения дыма из горящего помещения в коридоры разработана рабочая документация на систему противодымной защиты помещений, не имеющих ограничений по связям с окружающей средой, основанную на создании избыточного давления воздуха из расчета не менее 20 Па [2] в самых дальних точках коридоров с использованием существующих систем подпора воздуха в лестничные клетки посредством перетекания воздуха в лестнично-лифтовые холлы и коридоры через «нормально закрытые противопожарные клапаны» с расчетным обоснованием.

В пользу такого подхода свидетельствуют частично нормативные допущения (п.5.6.2.5 [1]) и опыт применения приточных систем

ПДЗ для защиты коридоров и помещений, приведенный в издании [7].

По условиям расчета не рассматривается возможность одновременного возникновения двух и более независимых пожаров в пределах одного блока, а также возникновение одновременно с пожаром других аварийных исходных событий. Удаление газообразных продуктов сгорания после ликвидации пожара предусматривается с помощью средств штатной вентиляции (по аналогии с требованиями п. 5.6.2.2 [1]) или передвижными вентиляционными установками.

Конструктивное исполнение предлагаемой системы подпора воздуха в холлы и коридоры представлено на рис. 2 в виде схемы, которая используется при расчетах.

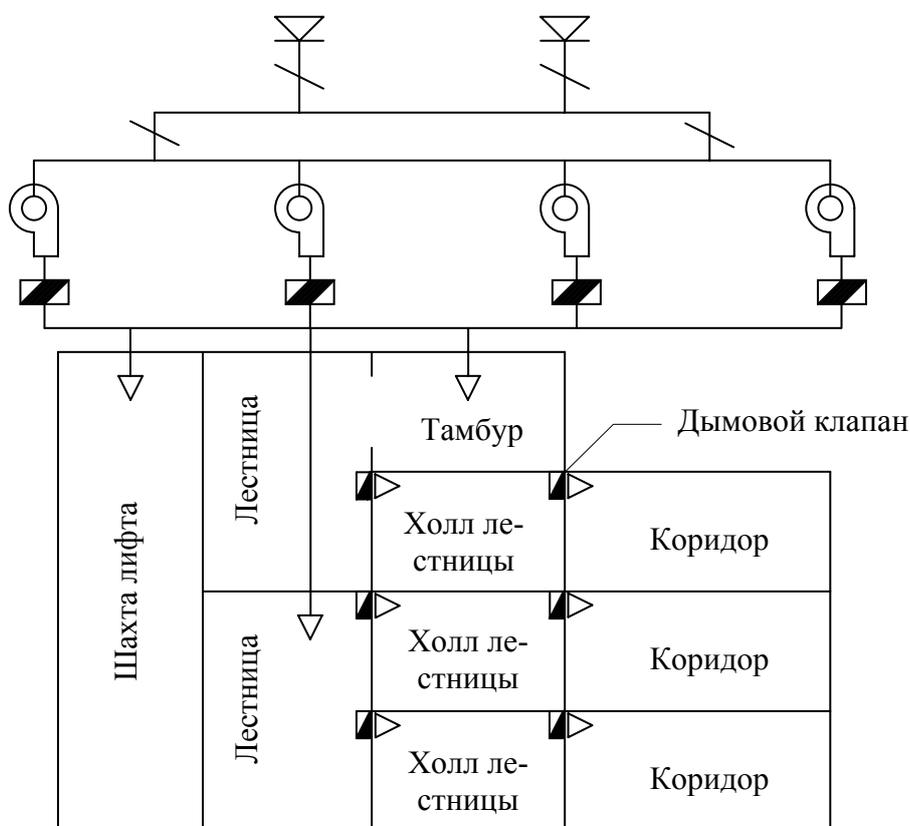


Рисунок 2 — Схема системы противодымной защиты (подпора воздуха) РО АЭС

Подача приточного воздуха производится посредством перетекания воздуха из лестничных клеток в холлы и коридоры через систему последовательно размещенных нормально закрытых противопожарных клапанов (дымовые клапаны). На отметках, где расположены коридоры, в лестничных клетках предусмотрена установка осевых вентиляторов, обеспечивающих необходимую подачу воздуха в холлы и коридоры с учетом требуемого расхода.

Выполнение перетока воздуха из лифтовой шахты в холлы

представляется менее эффективным, что связано с различием фактического сопротивления лестничной клетки и лифтовой шахты, неодинаковой нагрузкой вентиляторов, обеспечивающих подачу в них воздуха, и как следствие может привести к существенной разнице давления в холле и лестничной клетке. В этом случае при превышении давления в холле давления в лестничной клетке и запаздывания срабатывания системы ПДЗ продукты горения могут проникать в лестничную клетку из холла через открытые дверные проемы, что приведет к задымлению эвакуационных путей.

При подаче воздуха в холлы и коридоры из лестничной клетки воздух распределяется между ними в соответствии с фактически установленными сопротивлениями. Такой приток обеспечивает надежную защиту людей при пожаре.

При расчете системы подпора воздуха принимается, что пожар возможен на одном из этажей и клапан открывается только на этаже пожара. Расчет производится для каждого отсека лестничной клетки, расположенного ниже и выше рассечки. Подача воздуха на отметку – 4.200 м предусмотрена через дымовой клапан из нижней части отсека лестничной клетки, расположенного ниже верхней рассечки.

При проведении расчетов учитываются требования п. п. 5.16, 5.17 [2]. Определение параметров системы подпора воздуха в коридоры производится для максимальных значений расхода и давления воздуха с учетом специфики конструктивных и объемно-планировочных решений лестнично-лифтовых узлов и коридоров.

Выводы.

1. Проведенные расчеты выполнены в соответствии с действующими нормативными методиками и дают возможность проводить оценку уровня обеспечения безопасности людей при пожаре в помещениях ЗСР РО АЭС.

2. Представленными расчетными оценками установлено, что безопасность людей при пожаре в ЗСР РО АЭС обеспечивается и при существующей системе ПДЗ путей эвакуации при условии обеспечения ее надежности с вероятностью эффективной работы $P_{п.з.} \geq 0,99$. Однако, с учетом нормативных требований [1, 2] возникает необходимость в ПДЗ поэтажных коридоров здания.

3. Для повышения уровня безопасной эксплуатации АЭС и выполнения требований норм, считаем целесообразным предусмотреть специальные системы подпора воздуха в лестнично-лифтовые холлы и в коридоры на этапах движения людей перед выходом в незадымляемую лестничную клетку.

4. Учитывая, что приведение системы ПДЗ ЗСР РО в соответствие с требованиями норм будет проводиться в условиях действующего блока, считаем, что система подпора воздуха в коридоры при

определенной реконструкции существующей системы подпора воздуха в лестничные клетки и шахты лифтов обеспечит безопасную эвакуацию людей из ЗСР РО в течение расчетного времени при пожаре на любой отметке здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВБН В.1.1-034-03.307-2003 Противопожарные нормы проектирования атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами.
2. СНиП 2.04.05-91 Отопление, вентиляция и кондиционирование.
3. Толубенко В.Г. Проблемы противопожарной защиты реакторных отделений АЭС Украины //Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. – Харьков: УГЗУ, 2007. – Вып. 21.– С.268-274.
4. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
5. Устройство дымоподавления. Паспорт. ГИБК.065289.001.
6. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Остапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
7. Батчер Е., Парнэлл А. Опасность дыма и дымозащита / Пер. с англ. Е.Ш. Фельдмана; Под ред. В.М. Есина. – М.: Стройиздат, 1983. – 152 с.
nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 26.08.2008 г.