

Применение бетонов для защиты ядерных реакторов при высоких температурах

В. Б. Дубровский, Н. В. Краснояров, М. Я. Кулаковский,
Б. К. Пергаменщик, М. С. Пинхасик, В. И. Савицкий

Исследована возможность выполнения тепловой защиты реактора из хромитового и шамотного жаропрочных бетонов. Рассмотрены потоки нейтронов различной интенсивности (до 10^{13} нейтр/см².сек, близкие по спектру к спектру деления), воспринимаемые защитой из этих материалов. Рассчитано прохождение нейтронов, потоки γ -квантов и тепловыделение в защите. Для различных потоков нейтронов, толщин бетона и условий охлаждения вычислены температуры в защите. Произведен статический расчет температурных напряжений конструкции защиты из жаростойкого железобетона.

Установлено, что защита ядерных реакторов может выполняться из жаростойкого железобетона при потоках нейтронов на бетон до 10^{13} нейтр/см².сек, температурах до 1000—1100° С и перепадах температур до 900° С.

Использование бетонов для защиты ядерных реакторов в режимах высоких температур возможно при следующих условиях:

1) бетон должен обладать эффективными защитными свойствами как от нейтронного, так и от γ -излучения, а также сохранять удовлетворительные механические и теплотехнические характеристики;

2) температурные напряжения, возникающие в бетоне и арматуре, деформации и трещины не должны превышать допустимых величин;

3) бетон должен обладать радиационной стойкостью при данных интегральных потоках нейтронов.

В связи с повышением тепловых нагрузок в биологической защите энергетических реакторов и стремлением избавиться от тепловой защиты были проведены исследования жаростойкости некоторых бетонов, ранее уже нашедших применение в биологических защитах [1, 2]. Определялись теплофизические характеристики, уменьшение прочности и модуля упругости при различных температурах для обычного, баритового, магнетитового, лимонитового и других специальных бетонов. Поскольку эти бетоны были созданы как эффективные защитные, а не теплостойкие материалы, оказалось, что они пригодны для использования при температурах всего 100—350° С. Однако в исследованиях [1, 2] не были получены все характеристики, необходимые для расчета температурных напряжений.

Вопрос о расчете температурных напряжений в бетонной защите ядерных реакторов достаточно глубоко не разрабатывался. Различные авторы [2—5], проводившие оценочные расчеты температурных напряжений в железобетоне защиты исходили из классической теории упругости [6]. На основании таких расчетов рекомендовалось ограничивать перепад температур по толщине защиты 30—90° С, так как дальнейшее его увеличение требует такого количества арматуры для восприятия растягивающих напряжений, при котором конструкция оказывается невыполнимой. Следует отметить, что указанные расчеты нельзя считать достоверными, поскольку в них не учитываются пластические свойства бетона и стали, а также изменение прочности, упругости, ползучести, усадки, коэффициентов линейного расширения бетона и арматуры в зависимости от температуры.

Расчет температурных напряжений защиты по методам теории упругости приводит к завышенным результатам, которые вынуждают располагать между баком реактора и бетоном защиты тепловую защиту, снижающую потоки излучения и тепловыделение в бетоне. Тепловая защита выполняется из дефицитных и дорогостоящих материалов и значительно усложняет конструкцию реактора. Указанные обстоятельства усугубляются в быстрых реакторах, для которых характерны более высокие потоки излучения.

В настоящей работе рассматривается возможность выполнения тепловой защиты реактора из хромитового и шамотного жаростойких бетонов (рис. 1). Хромитовый бетон выбран потому, что он обладает удовлетворительными с физической точки зрения характеристиками: наличие легких ядер кислорода, существенный неупругий увод нейтронов и значительное сечение захвата тепловых и эпитепловых нейтронов ядрами хрома и железа обеспечивают эффективное замедление и поглощение нейтронов. Относительно высокая плотность (~ 3 г/см³) делает хромитовый бетон эффективным защитным материалом и от γ -излучения. Шамотный бетон

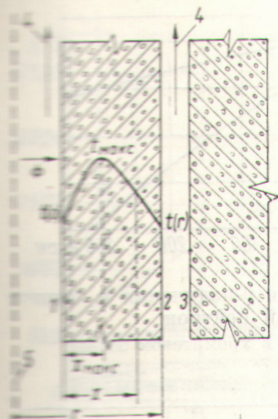


Рис. 1. Схема защиты:
1, 2 — внутренние и наружная поверхности слоя жаропрочного бетона соответственно; 3 — внутренняя поверхность слоя обычного бетона; 4 — газохладитель; 5 — ось реактора; t_{max} — максимальная температура; $t(r)$ — температура наружной поверхности слоя; $t(0)$ — температура внутренней поверхности слоя; Φ — поток нейтронов; r — расстояние от источника.

характеризуется менее удовлетворительными защитными свойствами, однако широко используется в промышленности [7—10].

Химический состав бетонов, жаростойкость, прочность, теплотехнические свойства и т. д. (согласно литературным и нормативным данным [7, 11, 12]) приведены в табл. 1 и 2. Использование хромитового и шамотного бетонов в высоких потоках излучения и, следовательно, при высоких температурах может привести к тому, что почти вся химически связанная вода будет удалена из бетона. Поэтому защитные свойства указанных материалов определялись по приведенным в табл. 1 составам с исключением из них воды.

Состав излучения, падающего на защиту, существенно отличается для различных реакторов как по спектру утечки нейтронов, так и по соотношению между нейтронным потоком и γ -излучением. Определяющим с точки зрения тепловыделения в защите тепловых реакторов, как правило, является γ -излучение, для быстрых реакторов — нейтронный поток (захватные γ -излучение).

В данной работе рассчитано тепловыделение в бетоне, определяемое потоками нейтронов, в предположении, что поток γ -излучения, падающего на защиту, равен нулю. Однако на основании результатов настоящей работы нетрудно оценить поток смешанного излучения. Для удобства расчета принята следующая схема: источником нейтронов служит бесконечная пластина из чистого Pu^{239} толщиной 5 см, за которой размещается исследуемый бетон. Спектр утечки нейтронов из такой пластины близок к спектру деления.

Расчет прохождения нейтронов производился в 18-групповом приближении [13]. Ниже приведено распределение нейтронов по группам (см. стр. 526).

Прохождение быстрых нейтронов ($E > 1,4 \text{ Мэв}$) описывалось с помощью метода сечения выведения [5, 14, 15]. Выведенные

Таблица 1

Химический состав хромитового и шамотного бетонов, вес. %

Бетон	Элементы										
	Si	Ca	O	Mg	Al	Fe	S	H	Cr	Na	Прочие
Хромитовый . . .	2,9	4,7	35	9,3	5,6	8,3	0,6	0,6	32	1	—
Шамотный . . .	20,8	7,3	53,5	0,41	12,40	0,84	0,05	1,9	—	—	2,8

Таблица 2

Свойства хромитового (марки 400) и шамотного бетонов

Бетон	Объемный вес, t/m^3	Предельно допустимая температура нагрева, $^{\circ}C$	Коэффициент теплопроводности при температуре нагрева $700^{\circ}C$, $\frac{kcal}{m \cdot ч \cdot ^{\circ}C}$	Коэффициент суммарной температурной линейной деформации при температуре нагрева $700^{\circ}C$	Модуль упругости при комнатной температуре, kg/cm^2	Расчетное сопротивление бетона сжатию при изгибе при комнатной температуре, kg/cm^2
Хромитовый	2,8—3,0	1700	1,35	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^5$	200
Шамотный	1,8—2,0	1200	0,98	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^5$	200

Номер группы	$E_{мин}, Мэв$	Номер группы	$E_{мин}, Мэв$	Номер группы	$E_{мин}, Мэв$
1	1,4	7	0,025	13	$0,2 \cdot 10^{-4}$
2	0,6	8	0,01	14	$0,73 \cdot 10^{-5}$
3	0,4	9	$0,18 \cdot 10^{-2}$	15	$0,27 \cdot 10^{-5}$
4	0,2	10	$0,4 \cdot 10^{-3}$	16	$0,1 \cdot 10^{-5}$
5	0,1	11	$0,15 \cdot 10^{-3}$	17	$0,37 \cdot 10^{-6}$
6	0,05	12	$0,54 \cdot 10^{-4}$	18	$0,37 \cdot 10^{-6}$

быстрые нейтроны служили источниками для нейтронов более низких групп. Потoki нейтронов с $E < 1,4 Мэв$ рассчитывались в диффузионно-возрастном приближении [16]. Полученные распределения нейтронных потоков по толщине хромитового и шамотного бетонов приведены на рис. 2 (суммарный поток нейтронов, падающих на защиту, нормирован на $1 нейтр/см^2 \cdot сек$). Из рис. 2 следует, что суммарный поток нейтронов на толщине хромитового бетона в $200 см$ ослабляется примерно в 10^4 раз, быстрых нейтронов — в 10^7 раз. На такой же толщине шамотного бетона суммарный поток нейтронов уменьшается только в 20 раз, а быстрых — в 10^4 раз. Недостаточная эффективность шамотного бетона указывает на целесообразность рассмотрения в дальнейшем только хромитового бетона (длина релаксации суммарного потока нейтронов $19 см$, быстрых нейтронов $12,2 см$, линейный коэффициент поглощения γ -излучения с энергией $6 Мэв$ $0,087 см^{-1}$).

На основании полученных нейтронных потоков определялась плотность источников захватного γ -излучения и в соответствии с методикой, описанной в работе [17], рассчитывались потоки γ -излучения и тепловыделение. Результаты

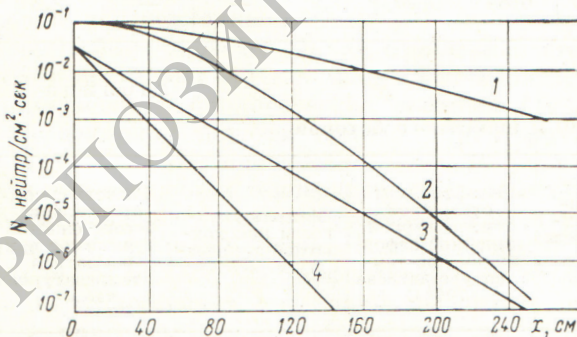


Рис. 2. Распределение нейтронных потоков в защите: 1 — суммарный поток в шамотном бетоне; 2 — суммарный поток в хромитовом бетоне; 3 — быстрые нейтроны ($E > 1,4 Мэв$) в шамотном бетоне; 4 — быстрые нейтроны ($E > 1,4 Мэв$) в хромитовом бетоне.

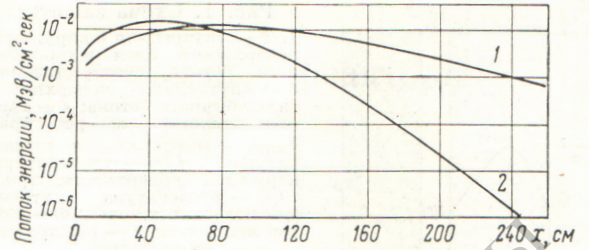


Рис. 3. Распределение потоков γ -излучения в защите на один падающий нейтрон: 1 — в шамотном бетоне; 2 — в хромитовом бетоне.

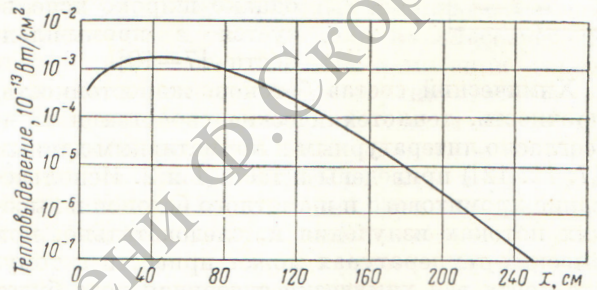


Рис. 4. Распределение тепловыделения в защите из хромитового бетона на один падающий нейтрон.

расчетов приведены на рис. 3 и 4. Как показывают расчеты, поток нейтронов в $1 нейтр/см^2 \times сек$ соответствует полному тепловыделению в хромитовом бетоне $\sim 1,4 \cdot 10^{-13} Вт/см^2$, что эквивалентно потоку γ -излучения на бетон $\sim 1 Мэв/см^2 \cdot сек$. Это соотношение может быть использовано для оценок при определении допустимого потока смешанного излучения на хромитовый бетон. При расчете температур были приняты следующие упрощающие допущения: не учитывалась утечка тепла в вертикальном направлении; теплопроводность хромитового бетона принималась во всем диапазоне температур постоянной и равной $1,35 ккал/м \cdot ч \cdot ^\circ C$; поверхность защиты охлаждалась газом с температурой во всех точках $50^\circ C$; коэффициент теплопередачи был одинаковым для внутренней и наружной поверхности слоя защиты. Распределение температур по толщине хромитового бетона может быть представлено формулой

$$t(x) = -\frac{1}{\lambda} P(x) + C_1 x + C_2,$$

где $C_1 = \frac{\alpha}{\lambda} P(\delta) + Q(\delta)$; $C_2 = \frac{\lambda}{\alpha} C_1 + t_{газ}$; $Q(x) = \int_0^x q(y) dy$; $P(x) = \int_0^x Q(y) dy$; λ — теплопровод-

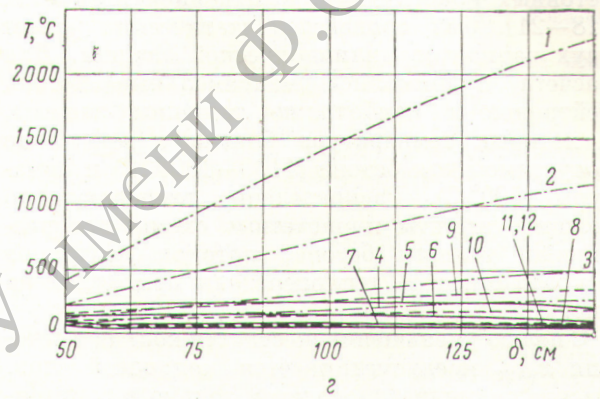
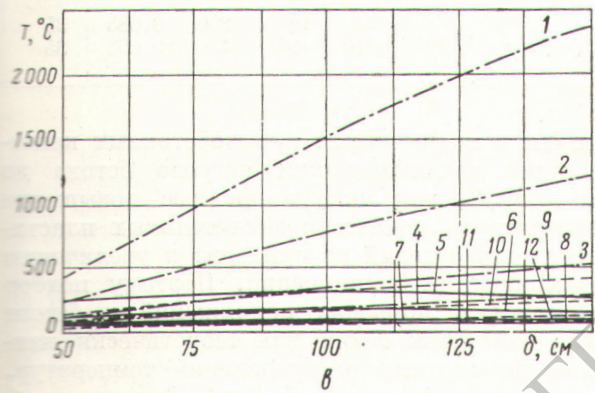
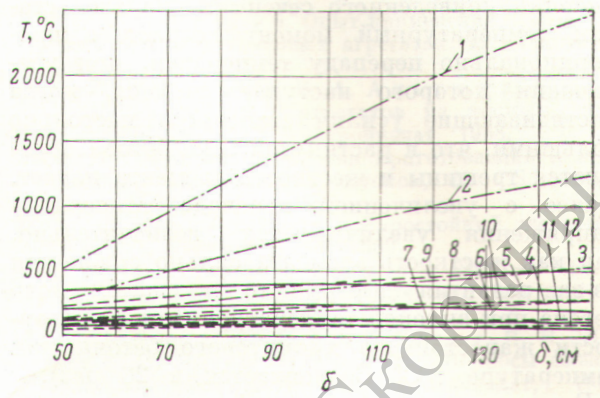
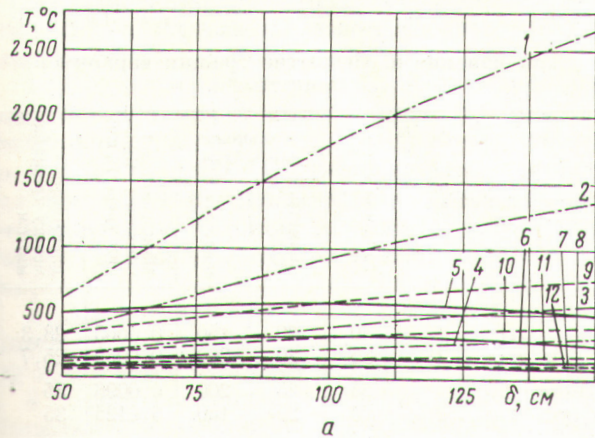


Рис. 5. Температура в точке x_{\max} и на поверхностях слоя защиты в зависимости от потока нейтронов Φ , коэффициента теплопередачи α и толщины слоя δ :

а — $\alpha = 10$ ккал/м²·ч·°С; б — $\alpha = 15$ ккал/м²·ч·°С; в — $\alpha = 20$ ккал/м²·ч·°С; г — $\alpha = 25$ ккал/м²·ч·°С; 1 — t_{\max} при потоке 10^{13} нейтр/см²·сек; 2 — $5 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 3 — $2 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 4 — 10^{12} нейтр/см²·сек; 5 — $t(r)$ при потоке 10^{13} нейтр/см²·сек; 6 — $5 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 7 — $2 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 8 — 10^{12} нейтр/см²·сек; 9 — $t(0)$ при потоке 10^{13} нейтр/см²·сек; 10 — $5 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 11 — $2 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек; 12 — 10^{12} нейтр/см²·сек.

ность бетона; α — коэффициент теплопередачи; $q(x)$ — распределение тепловыделения; δ — толщина слоя бетона.

Предполагается, что скорость охлаждающего газа составляет 2–10 м/сек. Это соответствует коэффициентам теплопередачи $\alpha = 10 \div 25$ ккал/м²·ч·°С. Расчет температур в бетоне проводился для значений $\alpha = 10; 15; 20; 25$ ккал/м²·ч·°С, потоков нейтронов $10^{13}; 5 \cdot 10^{12}; 2 \cdot 10^{12}; 10^{12}$ нейтр/см²·сек и толщин слоя бетона 75; 100; 125; 150 см. Температуры бетона в точке x_{\max} и на поверхностях слоя приведены на рис. 5, позволяющем при выбранном значении потока излучения и коэффициента теплопередачи определить толщину слоя защиты из хромитового бетона, при которой температуры нагрева бетона и арматуры не превышают предельно допустимых.

Неравномерный нагрев статически неопределимой конструкции, которой и является рассматриваемая нами защита (толстостенный цилиндр), приводит к возникновению изгибающих температурных моментов, в более нагретой части вызывающих сжимающие усилия, в менее нагретой — растягивающие. Если первые воспринимаются бетоном, то для восприятия вторых у менее нагретых наружных поверхностей должна быть установлена арматура. Температурный момент в стенке цилиндра при линейном перепаде температур зависит от перепада и жесткости сечения. Когда температура и температурный перепад невелики, железобетонное сечение работает как единое целое (трещин в растянутой зоне нет); жесткость сечения определяется по формуле

$$B = EJ,$$

Таблица 3

Армирование и раскрытие трещин вариантов защиты

Расчетная схема	Толщина слоя, см	Кольцевая арматура		Максимальная ширина раскрытия трещин, см	Расстояние между трещинами, см
		диаметр, мм	шаг, мм		
1 (см. рис. 6,1)	40	20	150	0,0065	23,3
	35	20	200	0,0069	25,7
2 (см. рис. 7,1)	55	25	200	0,0096	35
	70	25	150	0,0125	35
3 (см. рис. 6,2)	40	20	150	0,066	23,3
	35	20	200	0,085	25,7
4 (см. рис. 7,2)	55	25	200	0,083	35
	70	25	150	0,063	35

где E — модуль упругости бетона; J — момент инерции приведенного сечения. На этой стадии температурный момент возрастает пропорционально перепаду температур, при увеличении которого наступает момент, когда растягивающие усилия становятся настолько большими, что в растянутой зоне бетона образуются трещины и жесткость элемента падает. Далее с увеличением перепада температур напряжения увеличиваются незначительно, так как жесткость элемента сильно снижается из-за развития деформации в сжатой зоне бетона при высокой температуре (модуль упругости жаростойкого хромитового бетона при температуре 1000°C снижается в 20 раз).

В соответствии с методикой расчета железобетонных конструкций, изложенной в работах [18—21], был произведен статический расчет двух вариантов цилиндрической защиты. Для расчета принимались максимальные потоки нейтронов и наибольшие толщины защиты, в которых температура близка к предельно допустимой для бетона ($1100\text{—}1300^\circ\text{C}$) и арматуры (500°C). Распределение температур по толщине защиты и расчетные схемы для различных толщин бетона, потоков нейтронов и коэффициентов теплопередачи приведены на рис. 6 и 7.

С целью уменьшения жесткости кольца в сечении $x_{\text{макс}}$ предусматривается кольцевой шов. Расчет цилиндра проводится только в горизонтальном направлении. Перепады температур, соответствующие случаям, приведенным на рис. 6, 1 и 7, 1, не являются наиболее неблагоприятными с точки зрения температурных напряжений.

Экспериментальные исследования [19] показывают, что наибольшие температурные

усилия в жаростойких железобетонных конструкциях возникают при нагреве бетона до $500\text{—}600^\circ\text{C}$, так как дальнейшее повышение температуры вследствие значительных пластических деформаций не приводит к увеличению температурных напряжений. Поэтому подбор арматуры и проверка напряжений в бетоне были проведены также для теоретически наиболее невыгодных распределений температур, представленных на рис. 6, 2 и 7, 2.

При статическом расчете материалами служили хромитовый бетон марки 400 и арматура горячекатаная периодического профиля марки 2×13 .

Характеристики материалов и порядок расчета взяты из работы [12]. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

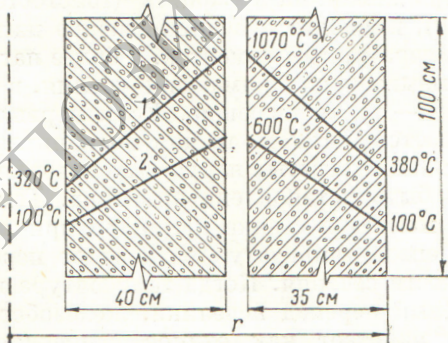


Рис. 6. Распределение температур в защите толщиной 75 см:

1 — $\Phi = 10^{10}$ нейтр/см²·сек, $\alpha = 15$ ккал/м²·ч·°C; 2 — наиболее неблагоприятное.

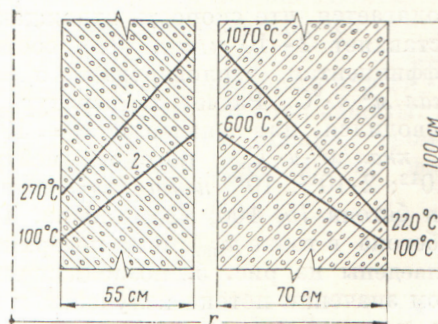


Рис. 7. Распределение температур в защите толщиной 125 см:

1 — $\Phi = 5 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек, $\alpha = 15$ ккал/м²·ч·°C; 2 — наиболее неблагоприятное.

На основании проведенных расчетно-теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Защита ядерных реакторов из жаропрочных бетонов может выполняться при потоках нейтронов на бетон до 10^{13} нейтр/см²·сек и $t \leq 1000-1100^\circ\text{C}$ с перепадом по толщине до 900°C . Для практического использования жаропрочных бетонов в защите необходимо провести исследование их радиационной стойкости.

2. Армирование бетонной защиты, напряжения и деформации не превышают величин, предусмотренных существующими нормами.

3. Бетон на портланд-цементе с хромитовым заполнителем обладает хорошими защитными свойствами даже при отсутствии в нем воды.

Поступила в Редакцию 21/1 1965 г.
В окончательной редакции 19/VII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Комаровский. Строительство ядерных установок. М., Госэнергоиздат, 1961.
2. J. Struct. Div., 84, 1 (1958).
3. D. Halliday. Heat Release in Concrete Reactor Shield HERE, R/p, 1963. Harwell, 1956.
4. J. Lape. Nucleonics, 13, No. 6, 36 (1955).
5. Б. Прайс, К. Хортон, К. Спинни. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
6. Bautechnik, No. 1, 7 (1962).
7. К. Д. Некрасов. Жароупорный бетон. М., Промстройиздат, 1957.
8. К. Д. Некрасов, А. В. Зотов. Приготовление огнеупорных бетонов и их применение в тепловых агрегатах. М., Стройиздат, 1950.
9. К. Д. Некрасов. Опыт применения жароупорного бетона в тепловых агрегатах. М., Госстройиздат, 1957.
10. В. И. Мурашов, Б. А. Альтшулер. Конструкции тепловых агрегатов из жароупорного железобетона. М., Госстройиздат, 1958.
11. Инструкция по технологии приготовления и применению жаростойких бетонов, № СН 156-61. М., Госстройиздат, 1962.
12. А. Ф. Милованов. Жаростойкий железобетон. М., Госстройиздат, 1963.
13. G. Marchuk. Proceeding of a Seminar Vienna (August, 1961). Physics of Fast and Intermediate Reactors. Vol. II. Vienna, 1962.
14. Д. Л. Бродер, А. А. Кутузов, В. В. Левин, В. В. Фролов. В сб. «Вопросы физики защиты реакторов». М., Госатомиздат, 1963, стр. 52.
15. Б. И. Синицын, С. Г. Цыпин. В сб. «Вопросы физики защиты реакторов». М., Госатомиздат, 1963, стр. 75.
16. Г. И. Марчук. Методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
17. Защита ядерных реакторов (сборник). Под ред. Т. Роквелла. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
18. В. И. Мурашов. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. М., Машстройиздат, 1950.
19. Исследования по жароупорному бетону и железобетону (сборник). Под ред. В. И. Мурашова. М., Госстройиздат, 1954.
20. Инструкция по проектированию железобетонных дымовых труб. М., Госстройиздат, 1962.
21. Временные указания по проектированию жароупорных железобетонных конструкций, № У-151-56 МСПМХП. М., Госстройиздат, 1957.

