

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

## О возможности перекрытия технологических трубопроводов АЭС намораживанием в них ледяных пробок

Э. В. Чечин

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Рассмотрены задачи, решение которых необходимо для обоснования применимости метода локального замораживания технологической жидкости в трубопроводных системах АЭС при проведении гидроиспытаний или ремонтных работ. Представлены результаты определения давления льда на внутреннюю стенку трубопровода от намороженной в нем ледяной пробки и оценено сопротивление ее смещению при нагружении трубопровода давлением жидкости. Предложена методика и описан экспериментальный стенд для определения влияния термоциклирования ( $293 \Leftrightarrow 77$  К) на механические характеристики материала элемента натурного трубопровода при многократном намораживании в нем ледяных пробок и последующем нагружении испытательным давлением в условиях, максимально приближенных к реальным.*

**Ключевые слова:** трубопроводы АЭС, ледяная пробка, давление льда, экспериментальный стенд, термоциклирование.

При проведении гидроиспытаний или ремонтных работ трубопроводов различного назначения (водопроводы, нефтепроводы и т.п.) в последнее время достаточно широко применяется технология перекрытия их ледяными пробками, намораживаемыми в заданных местах. Это позволяет выполнять соответствующие работы значительно быстрее и дешевле, чем традиционным способом с использованием огневой резки для расчленения трубопроводных систем на части с последующим восстановлением их сваркой. Кроме того, новая технология перекрытия трубопроводов исключает создание в них дополнительных очагов концентрации напряжений, остаточных (после сварки) напряжений, а также предотвращает опасность попадания сварочного грата в систему. Наиболее эффективным хладагентом в этом случае является жидкий азот, однако иногда оправданно применение и двуокиси углерода.

Несмотря на то что технология перекрытия трубопроводов с использованием метода намораживания в них ледяных пробок уже нашла широкое применение (есть информация об использовании на зарубежных АЭС [1]), ее нельзя без соответствующего экспериментального обоснования переносить на трубопроводные системы таких ответственных объектов, как атомные энергетические установки [2]. В то же время опыт, накопленный в криогенной лаборатории Института проблем прочности НАН Украины при проведении исследований конструкционной прочности разнообразных изделий

новой техники оболочечного типа, позволяет достаточно обоснованно подойти к решению задачи о возможности применения предлагаемой технологии для перекрытия трубопроводов АЭС.

Цель работы по обоснованию использования рассматриваемой технологии на первом этапе состояла в проведении исследования по определению величины давления льда на внутреннюю стенку трубы в зоне намораживания пробки и в оценке сопротивления последней смещению от испытательного давления жидкости в трубопроводе.

Второй этап работы заключается в выполнении комплексного исследования по определению влияния многократного намораживания ледяных пробок в элементе трубопровода при одновременном действии внутреннего испытательного давления на структуру и механические свойства основного металла труб и их сварных соединений. Такое исследование необходимо в связи с экспериментально установленным фактом [3–5] аномального снижения при низкой температуре предела текучести после термоциклирования ( $293 \leftrightarrow 77$  К) у некоторых хромоникелевых сталей, в том числе и у сталей типа 18-10, из которых изготовлены трубопроводные системы АЭС, а также для оценки живучести трубопровода, когда в специально предусмотренной зоне неоднократного намораживания ледяной пробки имеется необнаруженный контролем концентратор напряжения в виде поверхностной трещины. Как известно, снижение предела текучести происходит в области малого числа циклов ( $< 100$ ) и обусловлено протеканием  $\gamma - \epsilon$ -превращения в сталях.

Для выполнения исследований разработана методика и создан специальный экспериментальный стенд, обеспечивающий их проведение в условиях, максимально приближенных к реальным.

*Определение величины давления льда на внутреннюю стенку трубы от намораживания ледяной пробки и проверка сопротивления последней смещению при нагружении давлением жидкости.* Объектом исследования служили модели трубопровода (диаметр 50 мм, толщина стенки 0,5 мм, длина 500 мм) из стали 12Х18Н10Т. Выбор такой тонкостенной трубы обусловлен необходимостью создания высокочувствительной модели, поскольку первоначально предполагалось, что давление льда при намораживании ледяной пробки в локальной зоне достаточно длинного трубопровода не будет весьма большим. Измерение давления льда при намораживании ледяной пробки осуществляли с применением метода тензометрии. С этой целью на внешнюю стенку трубопровода в окружном и продольном направлении наклеивали тензорезисторы типа 2ФКП-200-5, отобранные из одной партии.

Испытания по определению давления льда проводили в следующем порядке.

Сначала проводили охлаждение сухого (без заполнения водой) трубопровода до температуры 77 К путем подачи жидкого азота в специально изготовленную охлаждающую камеру, установленную на том его участке, где наклеены тензорезисторы. Затем осуществляли ступенчатое нагружение трубопровода внутренним давлением газообразного гелия от 0 до 3 МПа с фиксированием показаний тензорезисторов через каждые 0,2 МПа на ленте цифрпечатающего устройства тензометрической системы “ЭПСИЛОН-М”.

После этого трубопровод заполняли водой, формировали в нем ледяную пробку путем подачи жидкого азота в охлаждающую камеру и проводили съем показаний тензорезисторов при отсутствии гидравлического давления. Далее трубопровод со сформированной ледяной пробкой нагружали ступенчато (через 0,2 МПа) гидравлическим давлением и осуществляли запись показаний тензорезисторов на каждой ступени.

При обработке результатов испытаний значения выходных сигналов тензорезисторов, полученные при испытаниях сухого трубопровода, определяли по формуле

$$v_c = 2(N_{c_i} - N_{c_0}), \text{ мкОм/Ом}, \quad (1)$$

где  $N_{c_i}$  и  $N_{c_0}$  – показания тензорезисторов, снятые при очередной ступени нагружения трубопровода соответственно внутренним давлением и давлением, равным нулю.

Значения выходных сигналов тензорезисторов  $v_m$  при нагружении давлением жидкости трубопровода со сформированной ледяной пробкой ввиду их малого изменения при повышении давления от 0 до 3,0 МПа определяли только для  $P = 3,0$  МПа по формуле

$$v_m = 2(N_{m_3} - N_{m_0}), \text{ мкОм/Ом}, \quad (2)$$

где  $N_{m_3}$  и  $N_{m_0}$  – показания тензорезисторов при давлении в трубопроводе, равном 3,0 МПа и 0 соответственно.

Величины выходных сигналов  $v_c$  и  $v_m$  приведены в табл. 1. Зависимость показаний выходных сигналов тензорезисторов, наклеенных в окружном направлении, от величины внутреннего давления в трубопроводе показана на рис. 1. Там же представлены данные о выходных сигналах тензорезисторов, наклеенных в окружном направлении, для трубопровода с ледяной пробкой при нулевом гидравлическом давлении, определенные как  $v_{m_0} = 2(N_{m_0} - N_{c_0}), \text{ мкОм/Ом}$ .

Т а б л и ц а 1

Выходные сигналы тензорезисторов при нагружении сухого охлажденного трубопровода ( $v_{c_i}$ ) и трубопровода с ледяной пробкой ( $v_m$ )

№ тензорезистора	Расположение тензорезистора	$v_{c_i}$ (мкОм/Ом) при $P$ (МПа)										$v_{m_3}$ (мкОм/Ом) $P = 3,0$ МПа
		0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	2,0	2,4	2,8	3,0	
1	Окружное	162	226	298	314	374	406	584	666	862	976	6
2		204	274	278	282	356	424	590	688	868	974	12
3		136	186	210	270	294	346	530	618	756	876	62
4		130	148	200	460	–	488	534	556	778	880	56
5		108	156	–	–	264	318	524	646	776	874	116
6	Продольное	–	–	–	–	–	–	–	–	–	270	264
7		–	–	–	–	–	–	–	–	–	226	200

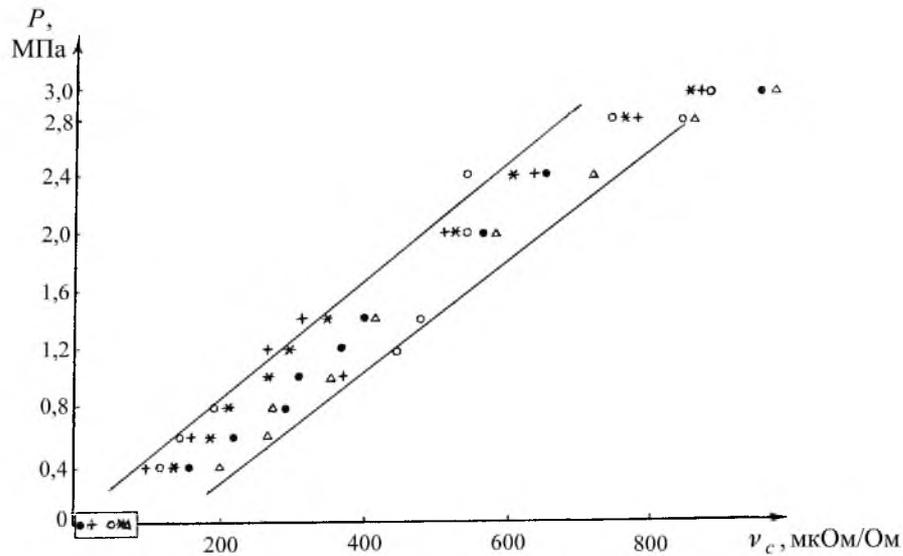


Рис. 1. Зависимость значений выходных сигналов окружающих тензорезисторов  $\nu_c$  от величины внутреннего давления  $P$ :  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $*$ ,  $\circ$ ,  $+$  соответствуют тензорезисторам № 1, № 2, № 3, № 4, № 5; в прямоугольнике на оси абсцисс – значения выходных сигналов тензорезисторов  $\nu_{m0}$  для трубопровода с замороженной пробкой при  $P = 0$ .

Анализ представленных данных (табл. 1, рис. 1) показал, что значения выходных сигналов тензорезисторов при изменении внутреннего давления газообразного гелия в трубопроводе от 0 до 3,0 МПа в выбранном диапазоне нагружения не выходили за полосу разброса, составляющую примерно 140 мкОм/Ом, что соответствует давлению 0,65 МПа. В этой связи при отсутствии возможности прямого измерения давления ледяной пробки на стенку трубопровода можно полагать, что его величина не вышла за пределы 0,65 МПа.

Из данных табл. 1 видно, что при максимальном давлении жидкости в трубопроводе со сформированной ледяной пробкой значения выходных сигналов тензорезисторов  $\nu_m$  оказались достаточно малы, за исключением выходных сигналов тензорезистора № 5, расположенного со стороны подачи под давлением рабочей жидкости. Вероятно, их повышение произошло вследствие небольшого отслоения тонкой стенки трубопровода от ледяной пробки. Однако жидкость, находившаяся в трубопроводе под давлением, соприкоснувшись с охлажденной до 77 К стенкой, быстро замерзла, что исключило отслоение. Отметим, что выходные сигналы наклеенных в продольном направлении тензорезисторов № 6 и 7 практически одинаковы при нагружении максимальным давлением как сухого трубопровода, так и со сформированной ледяной пробкой, что свидетельствует о корректности результатов испытаний.

Высокое сопротивление смещению ледяной пробки в трубопроводе, по нашему мнению, обеспечивается вследствие возникновения корсетности (уменьшения диаметра) трубопровода в зоне его охлаждения жидким азотом при намораживании ледяной пробки. Уменьшение диаметра натуральных трубопроводов в этом случае будет составлять (в зависимости от его величины)

несколько десятых долей миллиметра, что при наличии некоторой шероховатости внутренней поверхности обеспечит необходимое сопротивление смещению пробки. В дополнение к этому отметим, что, как показано в работе [6], и предел прочности при смятии образцов пресноводного льда, заключенного в обойму, т.е. нагружаемого в схожих условиях, может достигать весьма большой величины – 10 МПа.

Для наглядного подтверждения надежности перекрытия трубопровода ледяной пробкой проведены дополнительные испытания более прочной модели трубопровода с толщиной стенки 2,5 мм, но того же диаметра, что и тонкостенная модель. После формирования ледяной пробки трубопровод неоднократно нагружали внутренним давлением до 16 МПа с выдержкой в течение 15 мин. Нарушения герметичности модели в зоне пробки не обнаружено.

*Методика проведения исследований по оценке влияния термоциклирования 293 ⇌ 77 К.* Для определения влияния многократных (до 100) теплосмен (293 ⇌ 77 К) с одновременным действием испытательного давления на механические характеристики основного металла и сварных соединений технологических трубопроводов АЭС, на сдвиг критической температуры хрупкости металла и сварных соединений, а также на долговечность (живучесть) трубопроводов с острыми поверхностными надрезами, имитирующими необнаруженные контролем дефекты металлургического происхождения, необходимо провести специальные исследования на элементе натурального трубопровода. В дополнение к полученным данным по результатам испытаний на ударную вязкость образцов, вырезанных из зон многократного намораживания ледяных пробок натурального элемента трубопровода, следует выполнить расчет сопротивления металла (сварных соединений) хрупкому разрушению.

Влияние многократных теплосмен при действии определенного испытательного давления на механические свойства материала трубопровода необходимо оценивать по данным испытаний на растяжение стандартных образцов, вырезанных из зон элемента трубопровода, подвергнутых термоциклированию и без него. При этом величина давления гидроиспытаний должна быть не меньше определенной по формуле [2]

$$P_n = 1,25 P [\sigma]^{T_n} / [\sigma]^T, \quad (3)$$

где  $P$  – рабочее давление;  $[\sigma]^{T_n}$  – номинальное допускаемое напряжение при температуре гидроиспытания;  $[\sigma]^T$  – номинальное допускаемое напряжение при рабочей температуре.

Сдвиг критической температуры хрупкости металла трубопровода вследствие термоциклирования определяют по формуле

$$\Delta T_{\text{тц}} = T_{\text{ктц}} - T_{\text{к0}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{ктц}}$  – критическая температура хрупкости металла, подвергавшегося термоциклированию;  $T_{\text{к0}}$  – критическая температура хрупкости металла в исходном состоянии (до термоциклирования).

Оценку влияния термоциклирования на живучесть трубопроводов с поверхностными дефектами типа трещины, которые не обнаружены входным неразрушающим методом контроля (например, закат), но могут попасть в зону неоднократного намораживания ледяных пробок, необходимо провести по результатам испытаний элемента трубопровода с достаточно “жесткими” концентраторами напряжений – острыми поверхностными надрезами с радиусом у вершины  $\rho < 0,2$  мм, выполненными вдоль оси трубопровода в зонах, подвергаемых термоциклированию и без него. В этом случае нагружающее пульсирующее давление элемента трубопровода после проведения программы испытаний по термоциклированию выбирается таким, чтобы в стенке трубопровода создавались растягивающие напряжения, величина которых не меньше действующих в реальном трубопроводе при гидроиспытаниях.

Об опасности резкого сокращения срока службы трубопроводов с острыми поверхностными дефектами можно судить по полученным ранее [7] результатам испытаний сосудов давления из стали 12Х18Н10Т с поверхностными надрезами различной остроты в условиях охлаждения до 77 К (табл. 2). Из табл. 2 видно, что с уменьшением радиуса поверхностного надреза с 3 до 0,2 мм при одинаковой глубине  $h$  и длине  $l$  надреза число циклов до разрушения сосуда уменьшилось более чем на порядок.

Т а б л и ц а 2

Сокращение живучести сосудов давления ( $D = 420$  мм,  $L = 870$  мм,  $t = 8$  мм) из стали 12Х18Н10Т с уменьшением остроты поверхностного надреза

$r$ , мм	$h/t$	$l$ , мм	$T$ , К	$P$ , МПа	$\sigma_{ном}$ , МПа (по нетто-сечению)	$N$ , цикл
3	0,5	120	77	15	383	4231
0,2	0,5	120	77	15	383	326

Результаты стендовых испытаний элемента трубопровода с жесткими концентраторами напряжений позволяют построить сравнительные кривые раскрытия берегов поверхностных надрезов и кривые циклической ползучести металла трубопровода, а также получить дополнительные данные о влиянии термоциклирования на живучесть трубопровода.

Для предварительной расчетной оценки сопротивления трубопровода хрупкому разрушению используются такие характеристики, как критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , критическая температура хрупкости  $T_k$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Если толщина стенки рассчитываемых элементов меньше, чем требуемая для определения значений  $K_{Ic}$  по ГОСТ 25506-85 и [2], то допускается использование величин критического раскрытия трещины  $\delta_c$  или  $J_{Ic}$ .

В соответствии с [2, 8] сопротивление хрупкому разрушению трубопровода (с учетом влияния термоциклирования) будет обеспечено, если для выбранного расчетного дефекта в виде трещины выполняется условие

$$K_I \geq [K_I], \quad (5)$$

где  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м<sup>1/2</sup>;  $[K_I]$  – допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений при гидравлических испытаниях.

Коэффициент интенсивности напряжений для цилиндрических элементов, нагружаемых внутренним давлением и температурным воздействием, допускается определять по формуле

$$K_I = \alpha(\sigma_p \beta_p + \sigma_{и} \beta_{и}) Q \left( \frac{\pi a}{10^3} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений;  $\sigma_p$  – составляющая напряжений растяжения, МПа;  $\sigma_{и}$  – составляющая изгибных напряжений, МПа;

$$\beta_p = 1 + 0,12(1 - a/c); \quad \beta_{и} = 2(1 - 0,64a)/l,$$

где  $a, l$  – глубина и длина трещины, мм;  $c$  – длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм;

$$Q = [1 + 4,6(a/2c)^{1,65}]^{1/2}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива при  $a \leq 0,25S$  и  $a/c \leq 2/3$ , где  $S$  – толщина стенки трубы.

*Экспериментальный стенд.* Основной частью стенда является элемент трубопровода 2 (диаметр 159 мм, длина 3 м, толщина стенки 7 мм) из стали 08X18H10T (рис. 2), сваренный кольцевыми швами из трех частей различной длины. Концы его заверены доньшками со штуцерами для обеспечения подвода и отвода технологической жидкости. В верхней части трубопровода установлены образцовые 3 и электроконтактные 4 манометры и расположены дренажные трубки, перекрываемые вентилями. В нижней части выполнены сливные отверстия, заглушенные спецпробками.

На элементе трубопровода одновременно устанавливаются две охлаждающие камеры 5, жидкий азот в которые подается из емкости 1. Одна из камер располагается на гладкой части трубопровода, другая – на участке кольцевого сварного шва. Охлаждающие камеры устанавливаются таким образом, чтобы расстояние от камер до торцов трубопровода, а также между камерами было разным. В этом случае при образовании ледяных пробок манометры 3 покажут разное давление, что будет свидетельствовать о полном перекрытии трубопровода ледяными пробками.

Гидравлическая система испытательного стенда выполнена в виде замкнутого контура, в который кроме исследуемого элемента трубопровода входит бак с рабочей жидкостью 6, насос 7 с электродвигателем, а также всасывающие и нагнетающие трубопроводы. Для обеспечения проведения исследований при температурах технологической жидкости, отличных от 293 К, и для ускорения процесса оттаивания намораживаемых ледяных пробок предусмотрен подогрев технологической жидкости в баке.

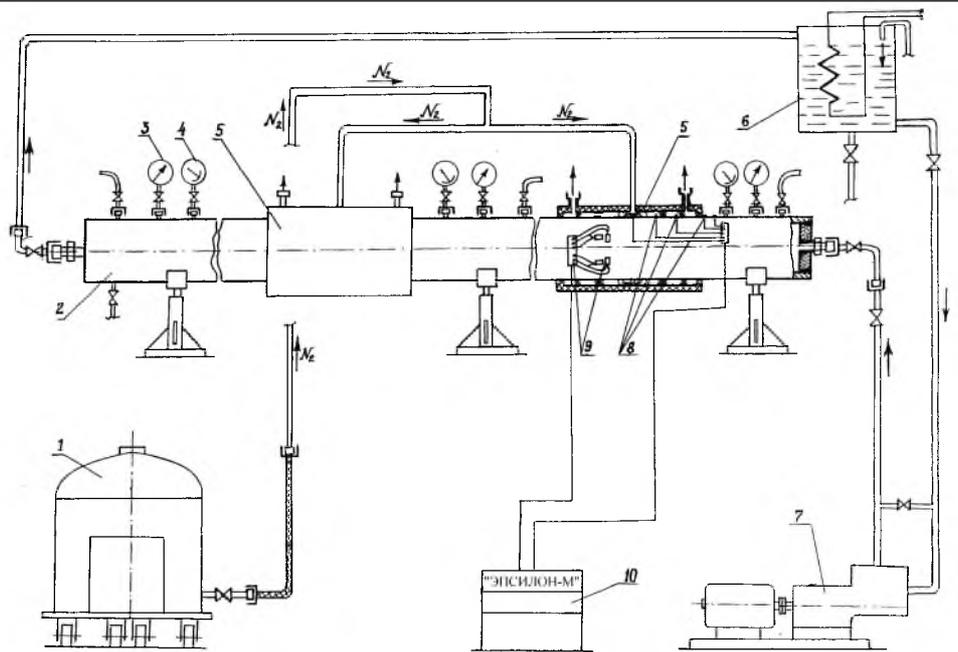


Рис. 2. Общая схема испытательного стенда для исследования влияния термоциклирования  $293 \leftrightarrow 77$  К на механические характеристики материала трубопроводов.

Сигналы от термапар 8, установленных в зоне намораживания ледяных пробок, и данные измерения упругопластических деформаций раскрытия поверхностных надрезов, получаемые с помощью специальных кольцевых тензометров 9 в процессе испытаний, регистрируются информационно-измерительной системой “ЭПСИЛОН-М” 10, которая предназначена для автоматизации исследований на прочность.

Таким образом, результаты проведенных исследований по определению давления ледяной пробки на стенку трубопровода и по оценке ее сопротивления смещению от давления жидкости в трубопроводе, предложенная методика исследований и созданный экспериментальный стенд для осуществления испытаний по определению влияния низкотемпературного термоциклирования на механические свойства металла и сварных соединений, а также на сдвиг критической температуры хрупкости, на живучесть трубопроводов с острыми поверхностными надрезами в условиях, приближенных к реальным, позволяют решить поставленную задачу с позиций прочности, надежности и долговечности. Завершение исследований по рассматриваемой технологии даст возможность использовать ее для перекрытия трубопроводов АЭС с существенным экономическим эффектом.

## Резюме

Розглянуто задачі, які необхідно вирішити для обґрунтування можливості застосування методу локального заморожування технологічної рідини в трубопровідних АЕС при проведенні гідровипробувань чи ремонтних робіт.

Представлено результати визначення тиску льоду на внутрішню стінку трубопроводу від замороженої в ньому льодової пробки і оцінено опір пробки зміщенню її при навантаженні трубопроводу тиском рідини. Запропонована методика та представлено опис експериментального стенду для визначення впливу термоцикловання ( $293 \Leftrightarrow 77$  К) на механічні характеристики матеріалу елемента натурального трубопроводу при багаторазовому заморожуванні в ньому льодових пробок і наступному навантаженні випробувальним тиском за умов, що максимально наближенні до реальних.

1. *Информационная система МАГАТЭ по инцидентам на АЭС, ИСИ-МАГАТЭ, отчет № 0942 FR 085.*
2. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86).* – М.: Энергоиздат, 1989. – 525 с.
3. *Медведев Е. М.* Особенности пластической деформации стали 0X18H10T после низкотемпературного термоциклирования // *Стали и сплавы криогенной техники.* – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 79 – 84.
4. *Беляков В. П., Степанов Г. А., Скольцов В. И.* Влияние температурно-силовых факторов на свойства криогенных аустенитных сталей // *Криогенные материалы и их сварка.* – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 227 – 229.
5. *Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. Д.* Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. – М.: Metallurgy, 1975. – 328 с.
6. *Коржавин К. Н.* Воздействие льда на инженерные сооружения. – Новосибирск.: Наука, 1962. – 220 с.
7. *Муратов В. М., Копысицкая Л. Н., Чечин Э. В., Шаршуков Г. К.* Малоцикловая усталость сварных соединений в изделиях криогенной техники // *Автомат. сварка.* – 1985. – № 11. – С. 12 – 16.
8. *Шатская О. А., Ривкин Е. Ю., Васнин А. М.* Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов ядерных реакторов // *Физ-хим. механика материалов.* – 1983. – № 4. – С. 103 – 107.

Поступила 29. 06. 2000