



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

---

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Российский Федеральный Ядерный Центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забахина»

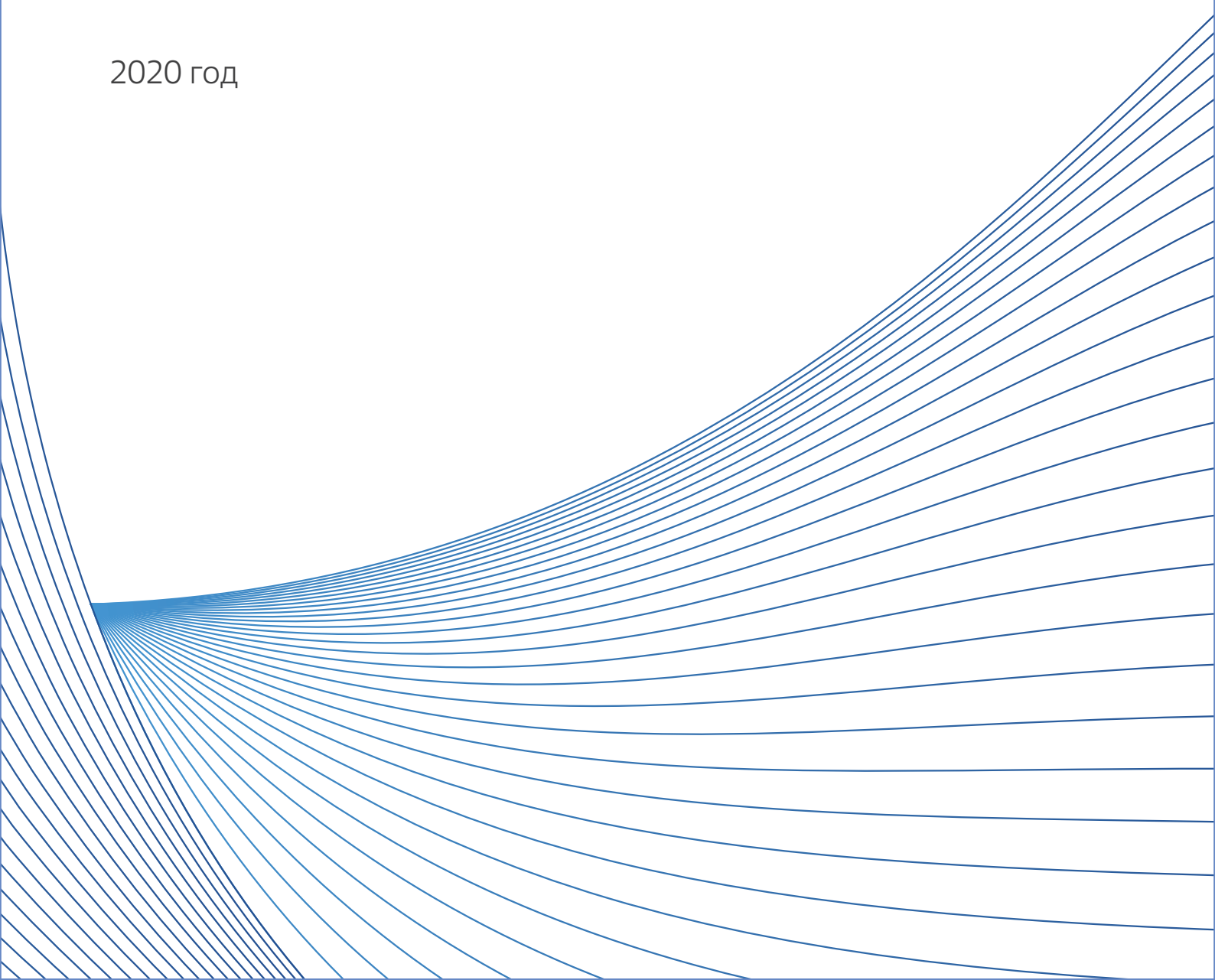
---

Препринт № 267

А. В. Абрамов, Д. А. Афремов, А. Н. Ефанов, П. А. Колесников,  
В. В. Лемехов, И. В. Минаев, М. Ю. Науменко, О. А. Никитин,  
В. А. Силаев, А. А. Табатчиков, В. В. Таусенев, А. В. Тутукин,  
Ю. С. Уфимцев, А. Н. Хрулев, Д. Б. Шадрин, А. Г. Юдов

## ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА

2020 год



## Оглавление

Список сокращений .....	2
Реферат .....	3
Введение .....	5
1. Исследование прочностных характеристик трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т .....	7
1.1. Определение физико-механических свойств стали ЭП302М-Ш .....	7
1.2. Определение несущей способности трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т .....	8
2. Модельный стенд для экспериментального обоснования безопасности ПГ РУ типа БРЕСТ при разгерметизации теплообменных труб .....	11
2.1. Конструкция модельного стенда .....	11
2.2. Создание дефекта в разрываемой трубе .....	13
2.3. Результаты экспериментов на модельном стенде .....	15
2.3.1. Эксперименты по истечению пароводяной смеси .....	15
2.3.2. Экспериментальное исследование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке .....	19
2.3.3. Выводы .....	21
3. Демонстрационный стенд для экспериментального обоснования безопасности ПГ РУ типа БРЕСТ при разгерметизации теплообменных труб .....	21
3.1. Конструкция демонстрационного стенда .....	21
3.2. Экспериментальное исследование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке .....	24
3.3. Численное моделирование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке .....	28
3.4. Выводы .....	32
Заключение .....	33
Литература .....	33
Приложение 1 .....	35
Приложение 2 .....	36
Приложение 3 .....	37
Приложение 4 .....	38

## Список сокращений

АЗ	активная зона
АЭС	атомная электрическая станция
БРЕСТ	быстрый реактор со свинцовым теплоносителем (энергоблок с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем с нитридным топливом и специфическим пристанционным замкнутым топливным циклом, с двухконтурной схемой отвода тепла к турбине с докритическими параметрами пара)
ЗТЦ	замкнутый топливный цикл
НДС	напряженно-деформированное состояние
НИКИЭТ	научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала
НТК	научно-техническая конференция
ОЯТ	отработанное ядерное топливо
ПГ	парогенератор
ПМ	программа-методика
РАО	радиационные отходы
РБМК	реактор большой мощности канальный
РТ	рабочее тело
РУ	реакторная установка
РФЯЦ – ВНИИТФ	Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забахина
ТЖМТ	тяжелый жидкометаллический теплоноситель
ТК	технологический канал (трубы давления в РУ РБМК)
ТТ	теплообменная труба
ФЦП	федеральная целевая программа

## **Реферат**

Приведены результаты работ, выполненных в 2012–2014 гг., по расчетно-экспериментальному обоснованию безопасности ПГ РУ типа БРЕСТ вследствие разрыва теплообменной трубы в трубном пучке парогенератора, когда реализуется динамическое взаимодействие истекающей пароводяной смеси с жидким свинцом и взрывное расширение капелек перегретой воды. Показана невозможность перехода разрыва одиночной трубы в множественный разрыв трубного пучка ПГ при формировании и распространении волны давления в ТЖМТ.

Дополнительно с результатами по одиночному разрыву в трубном пучке в ТЖМТ были получены количественные данные двухфазного потока, образующегося при барботаже водяного пара и струйном истечении через малое отверстие с визуализацией происходящих процессов.





## Введение

После аварии на АЭС «Фукусима-1» особую актуальность приобрела задача создания и внедрения новых реакторных технологий, изначально обладающих естественной безопасностью и обеспечивающих замыкание ядерного топливного цикла. Полное замыкание ЯТЦ возможно только путем развития технологий реакторов на быстрых нейтронах [1].

В России в 2010 году принята ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2030 года» [2]. В 2011 году стартовал проект «Прорыв» [3], консолидировавший основные положения этой программы, относящиеся к замыканию ЯТЦ на быстрых реакторах. Решается задача создания конкурентоспособной ядерно-энергетической технологии, исключающей тяжелые аварии и накопление ОЯТ и РАО.

В качестве инновационного быстрого реактора естественной безопасности в ФЦП рассматривается опытно-демонстрационный реактор со свинцовым теплоносителем электрической мощностью 300 МВт [4]. Отличие парогенератора по проекту БРЕСТ (рис. 1) от классических заключается в том, что он погруженного типа [5], то есть его теплообменная поверхность погружена в жидкий свинец, который циркулирует в реакторном блоке. Поверхность теплообмена, выполнена из витых (геликоидальных) труб с противоточным движением рабочего тела (вода – пар) и свинцового теплоносителя.

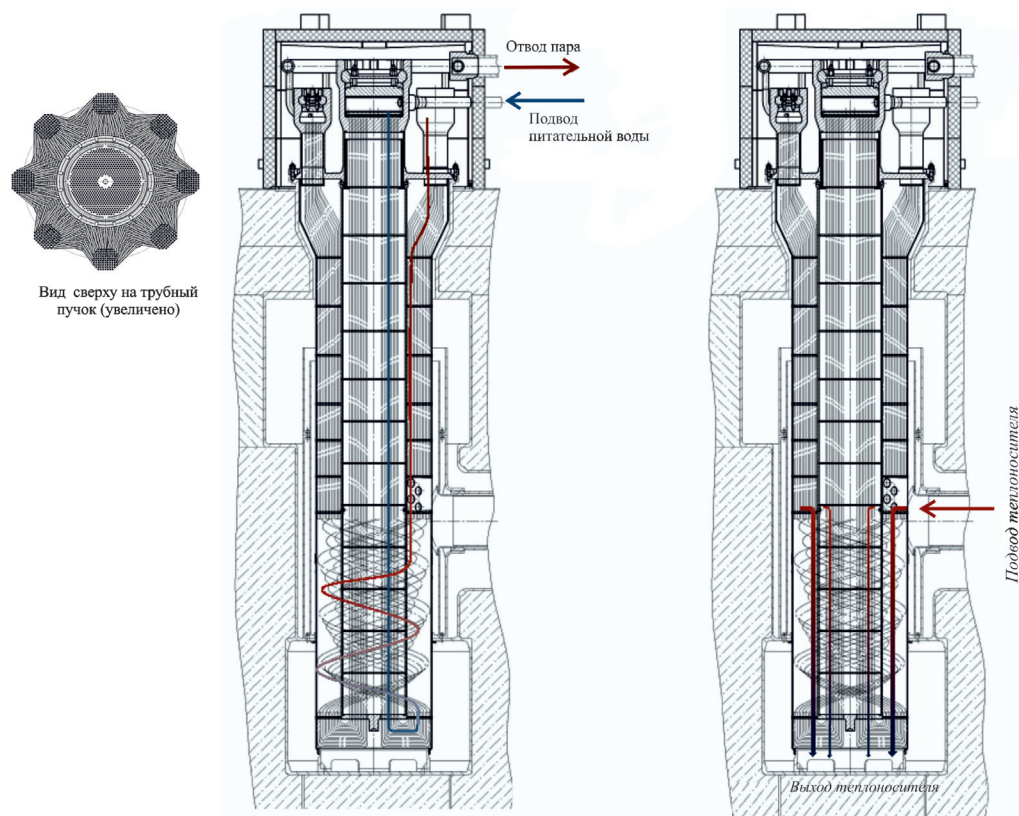


Рис. 1. ПГ РУ типа БРЕСТ, схема движения теплоносителя и РТ

Циркуляция свинца РУ через активную зону и парогенераторы осуществляется не напором насосов, а создаваемой ими разницей уровней «холодного» и «горячего» теплоносителей (температура входа/выхода свинца АЗ – 420/535 °С). ПГ должен работать с низким давлением теплоносителя в первом контуре (до 0,1 МПа) относительно давления РТ во втором контуре 17–18,6 МПа. Температура пара на выходе из ПГ – 505 °С. Для подобных многоканальных/многотрубных конструкций, находящихся под высоким давлением, одиночный разрыв канала трубы может явиться

инициатором повторных разрушений, т. е. одиночный разрыв может превратиться во множественный [9]. Таким образом, задача состоит в том, чтобы в консервативных условиях доказать невозможность перерастания одиночного разрыва теплообменной трубы во множественный.

Исследователями свойств двухфазного потока, образующегося при барботаже водяного пара через свинец [9, 12] рассматривалась динамика отдельных пузырьков легкой фазы и струйное истечение с образованием канала, заполненного легкой фазой, от места расположения источника течи до свободной поверхности свинцового теплоносителя.

Целью работ, результаты которых изложены в препринте, является доказательство **невозможности перерастания одиночного разрыва трубы ПГ РУ типа БРЕСТ во множественный** путем численного и экспериментального моделирования явления, с определенным консерватизмом, в условиях, максимально приближенных к натурным.

АО «НИКИЭТ» совместно с ФГУП РФЯЦ – ВНИИТФ 2012 году разработали две ПМ экспериментального обоснования безопасности РУ типа БРЕСТ при разгерметизации труб ПГ на модельном и демонстрационном стендах. В 2013 году на экспериментальной базе ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ» были начаты исследования, которые были закончены в 2014 году. Дополнительно с результатами по одиночному разрыву трубы в трубном пучке в ТЖМТ были получены количественные данные о параметрах двухфазного потока, образующегося при барботаже водяного пара и струйном истечении через малое отверстие через теплоноситель (свинец) с визуализацией процессов.

Для демонстрационных экспериментов был создан стенд Р066-М4, на котором проведены исследования процессов, происходящих при разрыве теплообменной трубы в трубном пучке ПГ РУ типа БРЕСТ. Для отработки технических решений, используемых в демонстрационном стенде, были проведены экспериментальные исследования на модельном (более простом) стенде Р066-М3 по истечению пара в жидкий свинец и моделированию разгерметизации трубы ПГ [6]. На модельном стенде были проведены эксперименты с визуализацией различных процессов истечения пароводяной смеси в виде рентгенографических изображений зоны взаимодействия с ТЖМТ и трубой-мишенью.

При проведении экспериментов на модельном и демонстрационном стендах проводилась регистрация следующих физических величин: медленноменяющегося (статического) давления тензодатчиками типа GEFRAN K32 (приведенная погрешность измерения давления в диапазоне от 2 до 35 МПа  $\pm 0,5\%$ ); динамического давления пьезоэлектрическими датчиками типа ДПС-012 (погрешность измерения давления в диапазоне 0,05–63 МПа  $\pm 8\%$  при температуре до 700°C); динамических температур низкоинерционными термомпарами типа КТХА 01.02-002-kl-H-T310-0,5 (погрешность измерений  $\pm 15^\circ\text{C}$  в диапазоне 200–600°C); относительной деформации привариваемыми тензорезисторами типа АWH (приведенная погрешность измерения деформации  $\pm 0,1\%$  в диапазоне  $\pm 6000 \text{ млн}^{-1}$  при температуре до 800°C).

Для обеспечения безопасности проведения экспериментов были выполнены прочностные расчеты корпусов стендов с расплавленным свинцом при статическом и динамическом приложении внутреннего давления, при различных режимах работы нагревателей корпуса и парогенератора. Проведен анализ динамических давлений действующих в рабочей зоне модельного и демонстрационного стенда и их крышек, и возникающих колебаний стендов в ходе проведения экспериментов. Также проведены расчеты элементов конструкции, работающих под давлением пара и газа, для которых определены величины гидравлического проверочного давления. Выполнен прочностной расчет по допускаемым напряжениям в соответствии с нормативными документами, регламентирующими работу сосудов высокого давления. По результатам проведенных прочностных расчетов были даны рекомендации по упрочнению конструкций и элементов крепления, которые реализованы при изготовлении стендов.

В препринте обобщены результаты расчетно-экспериментальных работ, проведенных в период 2012–2014 гг.

Итоги работы опубликованы в журнале «Атомная энергия» [6], докладывались на III Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2014) [7], научно-практической конференции «Проектное направление «Прорыв»: результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики» [8], НТК «Инновации в атомной энергетике» [13, 14] (на НТК доклады молодых специалистов отмечены грамотами за высокую научно-практическую ценность). Участие молодых специалистов в работе было отмечено премией имени Г. П. Ломинского РФЯЦ – ВНИИТФ в области технологии и экспериментальной отработки [16].

## 1. Исследование прочностных характеристик трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т

В конструкции парогенератора применены монометаллические трубы без сварных соединений по всей длине из аустенитной низкоуглеродистой жаростойкой кремнийсодержащей стали ЭП302М-Ш, коррозионностойкой в свинце и воде. В созданных экспериментальных стендах совместно с трубами из стали ЭП302М-Ш используются трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т.

### 1.1. Определение физико-механических свойств стали ЭП302М-Ш

Из трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш были вырезаны плоские образцы-лопатки длиной 95 мм, с рабочим сечением ~4×2,4 мм. Испытание образцов проводилось при температурах 20, 400, 500, 700, 800, 900°С.

В экспериментах разрушение всех образцов происходило в пределах рабочей части, при повышенных температурах – ближе к захватной части образца.

В результате испытаний определены следующие показатели механических свойств:

$\sigma_b$  – предел прочности;

$\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;

$\delta$  – относительное удлинение после разрыва.

В табл. 1 приведены статистически обработанные результаты механических испытаний образцов из стали ЭП302М-Ш при статическом растяжении при нормальной и повышенных температурах (среднее значение  $\bar{X}$ , среднее квадратическое отклонение  $S_{x_i}$  и коэффициент вариации  $V_{x_i}$ ).

Для экспериментально полученных показателей механических свойств стали ЭП302М-Ш ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$  и  $\delta$ ) при температуре 500 °С по трехпараметрическому закону распределения Вейбулла определены минимально возможные величины показателей механических свойств, описываемых выбранным законом распределения  $\bar{X} \min$  (табл. 1).

По экспериментальным значениям были построены зависимости (1) изменения механических характеристик от температуры, показанные на рис. 2.

$$\sigma_{0,2} = 387,8 - 0,26T, \quad (\sigma_{0,2} = 609,26 - 61,8 \cdot \ln(T));$$

$$\sigma_b = 736,4 - 0,0006T^2 - 0,0825T; \quad (1)$$

$$\delta = 46,6 - 0,04T.$$

где  $T$  – температура, °С;  $\sigma_b$  – предел прочности, МПа;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, МПа;  $\delta$  – относительное удлинение после разрыва, %.

Таблица 1

Значения механических характеристик стали ЭП302М-Ш при статическом растяжении при различных температурах

Температура испытаний	Стат. параметры	$\sigma_B$ , МПа	0,2, МПа	$\delta$ , %
20 °С	$\bar{X}$	741	425	46,0
	$S_{x_i}$	11	29	4,1
	$V_{x_i}$ , %	1,5	6,8	8,9
400 °С	$\bar{X}$	579	217	30,0
	$S_{x_i}$	28	38	2,2
	$V_{x_i}$ , %	4,8	17,7	7,2
500 °С	$\bar{X}$	566	243	27,8
	$S_{x_i}$	5	9	2,9
	$V_{x_i}$ , %	0,8	3,5	10,3
	$\bar{X}_{\min}$	547	215	19,8
700 °С	$\bar{X}$	457	235	18,0
	$S_{x_i}$	14	–	2,0
	$V_{x_i}$ , %	3,0	–	11,1
800 °С	$\bar{X}$	288	202	13,5
	$S_{x_i}$	14	8	1,9
	$V_{x_i}$ , %	4,9	3,7	14,2
900 °С	$\bar{X}$	203	172	12,4
	$S_{x_i}$	19	15	0,8
	$V_{x_i}$ , %	9,5	8,8	6,5

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом температуры механические характеристики стали ЭП302М-Ш снижаются.

## 1.2. Определение несущей способности трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т при действии внутреннего давления

Экспериментальные работы по определению несущей способности трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т при действии внутреннего давления и температуры проводились на образцах (рис. 3), конфигурация которых была выбрана по результатам численного моделирования упругопластического деформирования элемента теплообменной трубы. Для исключения влияния краевых эффектов закрепления трубы в экспериментах геометрические размеры были выбраны такими, чтобы расчетное упругопластическое напряженно-деформированное состояние рабочей части образца было аналогичным напряженно-деформированному состоянию полубесконечной трубы.

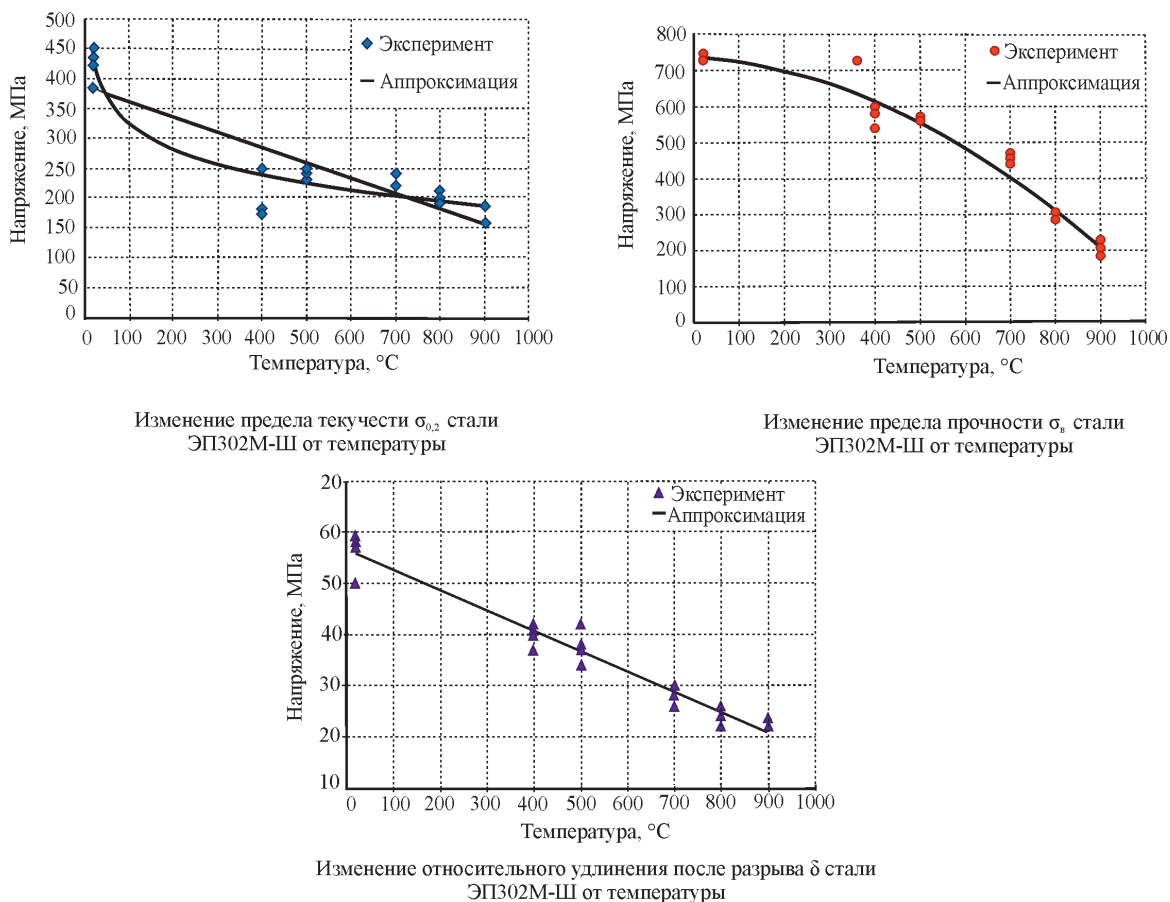


Рис. 2. Изменения механических характеристик от температуры

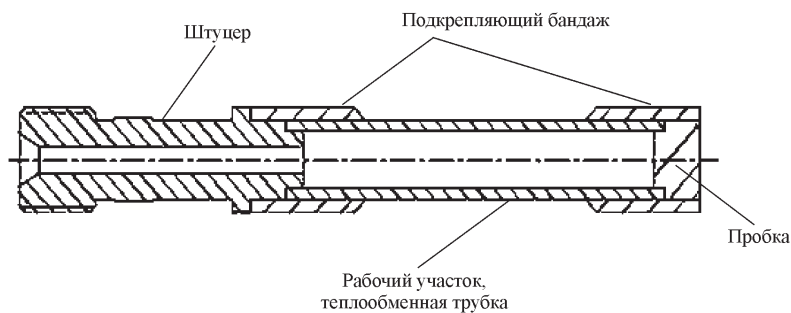


Рис. 3. Схема испытываемого образца

Испытания проводились в диапазоне температур 400–900 °С. При аналогичных температурах были проведены испытания образцов с ослабленным сечением (имитация фреттинг-износа или дефекта при изготовлении). По внешней поверхности трубы выполнялась лыска глубиной 2 мм (рис. 4).

В табл. 2 приведены величины давлений, при которых происходит разрушение образцов теплообменных труб из стали ЭП302М-Ш, предварительно нагретых до температуры 400, 500, 700, 800, 900°С.

По экспериментальным значениям для трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш были построены полиномиальная зависимость изменения разрушающего давления от температуры (для образцов с ослабленным сечением – линейная зависимость):

$$P_p = 182,6 - 0,0002T^2 + 0,17T;$$

$$P_p^0 = 80,2 - 0,04T \text{ – труба с лыской глубиной 2 мм} \tag{2}$$

где  $T$  – температура, °С;  $P_p$  и  $P_p^0$  – разрушающие давления, МПа.





Трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш



Трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш с ослабленным сечением (лыска), минимальная толщина стенки 1 мм



Трубы 18×2,5 мм из стали 12X18N10T

Рис. 4. Вид образцов после испытаний

Таблица 2

Величины разрушающих давлений образцов трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш

Вид образца	Разрушающее давление, МПа				
	400 °С	500 °С	700 °С	800 °С	900 °С
Образец с цилиндрическим сечением	222	213	185	168	90
	206	204	182		135
		195			
Образец с ослабленным сечением	65		53,3		45,9

По полученным данным в экспериментах были построены изменения прочности трубы 18×2,5 мм из стали 12X18N10T и трубы 18×3 мм из стали ЭП302-Ш от температуры (рис. 5).

Трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш при температуре меньше 500 °С имеют площадь разрыва значительно меньше площади поперечного сечения трубы. При температуре 700–800 °С площадь разрыва приближается к площади поперечного сечения трубы, при дальнейшем увеличении температуры площадь разрыва уменьшается. При наличии утонения по толщине трубы, разрыв происходит по дефекту и его площадь не зависит от температуры. Площадь разрыва определяется протяженностью дефекта.

Прочность трубы 18×2,5 мм из стали 12X18N10T при температуре 500 °С практически в два раза меньше, чем трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш, но выше максимального давления эксплуатации ПГ (18,6 МПа), что позволяет использовать ее в экспериментальных стендах в качестве нагружающей (разрушаемой) трубы и в качестве трубы-мишени для консервативной оценки прочности трубного пучка ПГ. Прочность трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш для образцов с ослабленным сечением (лыска глубиной 2 мм) при температуре 500 °С в три раза меньше чем цельной трубы.

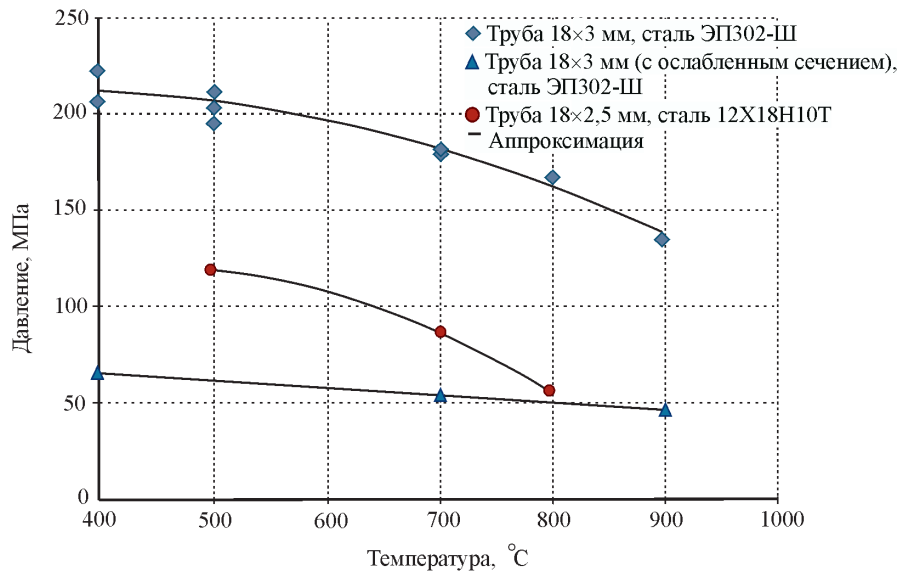


Рис. 5. Прочность трубы 18×2,5 мм из стали 12X18N10T и трубы 18×3 мм из стали ЭП302-III

## 2. Модельный стенд для экспериментального обоснования безопасности ПГ РУ типа БРЕСТ при разгерметизации теплообменных труб

### 2.1. Конструкция модельного стенда

В соответствии с требованиями ПМ на начальные эксперименты был разработан и изготовлен стенд Р066-М3 с зоной исследований высотой 1500 мм и диаметром 94 мм, элементы которого представлены на рис. 6.

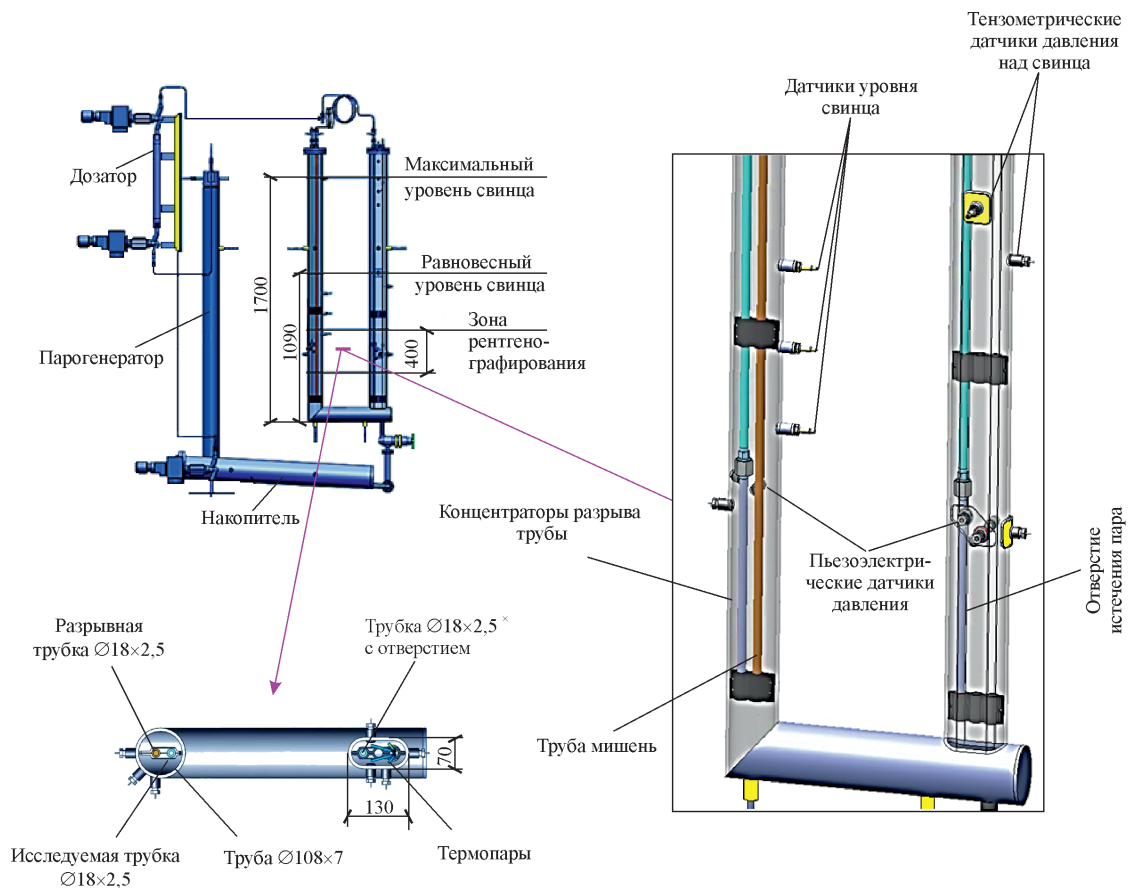


Рис. 6. Общий вид элементов модельного стенда



Рабочий участок стенда представляет собой U-образный сосуд (корпус стенда с крышками), заполняемый расплавленным свинцом. Выбранная конфигурация корпуса обеспечивает движение жидкого свинца температурой 500–520 °С в двух направлениях в момент взаимодействия пароводяной смеси со свинцом (имитация двух свободных поверхностей ТЖМТ в РУ типа БРЕСТ). Левое колено (см. рис. 6) выполнено цилиндрическим (диаметром 108 мм) и предназначено для исследования гильотинного разрыва теплообменной трубы. Правое колено, с двумя плоскими гранями толщиной 68 мм и шириной 130 мм, – для проведения рентгенографирования истечения пароводяной смеси в жидкий свинец. Для заполнения корпуса стенда расплавленным свинцом из накопителя и задания в нем перепада уровней используется газовая система, в состав которой входит баллон с аргоном.

Предварительное численное моделирование в лагранжево-эйлеровой постановке истечения пароводяной смеси в свинец, после образования дефекта удвоенной площади проходного сечения трубы, показало, что формируемый после разрыва нагружающей трубы в корпусе стенда большой пароводяной пузырь в стесненных условиях стенда вытесняет часть свинца вверх по принципу поршня, разгоняет его, в итоге свинец бьет по крышкам, срывая их с креплений. Расчеты показали, что избежать удара свинца по крышкам можно, установив в свинец дистанционирующие решетки (рис. 7).

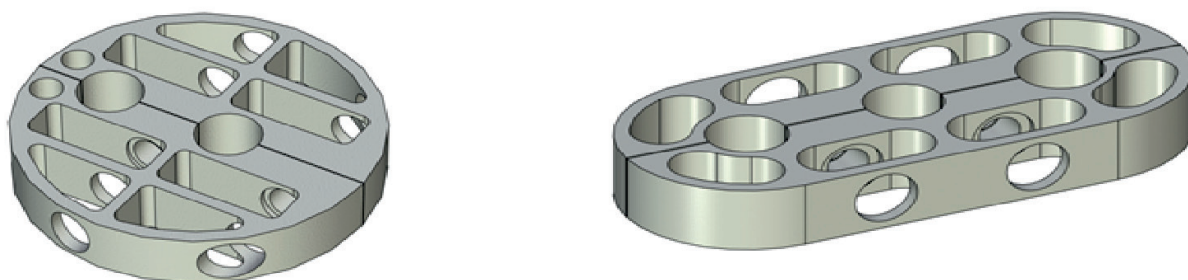
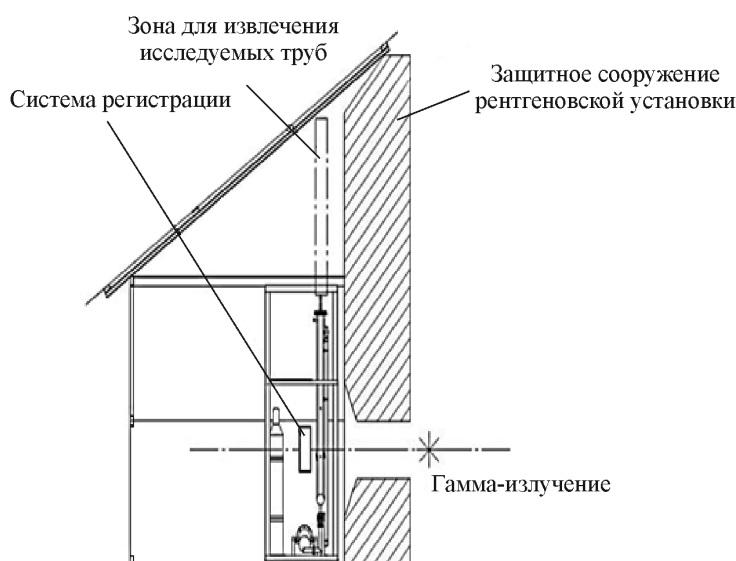


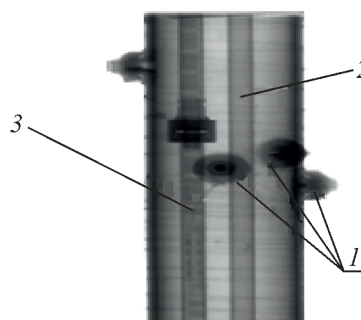
Рис. 7. Дистанционирующие решетки

На испытательном поле модельный стенд устанавливался в защитном сооружении рядом с рентгенографической установкой (рис. 8). Правильность расчетных выводов была подтверждена экспериментально. При работе стенда без дистанционирующих решеток произошел срыв крышки корпуса и выброс свинца и трубок за пределы защитного сооружения.

#### Модельный стенд в защитном сооружении



#### Рентгенограмма рабочего стенда без свинца до эксперимента



- 1 – пьезоэлектрические датчики давления;
- 2 – труба-мишень;
- 3 – разрываемая труба с концентраторами

Рис. 8. Схема проведения рентгенографирования

## 2.2. Создание дефекта в разрываемой трубе

При проведении экспериментов трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т в качестве разрываемых являются более предпочтительными, так как имеют меньшую прочность материала, в связи с чем остаточная толщина трубы в концентраторе будет примерно в два раза больше, чем для материала ЭП302М-Ш. Исходя из опыта экспериментальной отработки труб ТК РУ РБМК в ПМ предусмотрено, что нагружающая труба 18×2,5 мм должна разрываться при температуре 500–550 °С и давлении 18–25 МПа или незначительно выше). Конструкция разрываемой трубы должна обеспечивать стабильное получение дефекта площадью не менее удвоенной площади проходного сечения трубы 18×3 мм.

Расчетами были получены характерные геометрические параметры «Н-образного» концентратора (рис. 9), при которых разрушение трубы при температуре 500 °С ожидается при давлении 18–25 МПа. Форма концентраторов V-образная с закруглением 0,3 мм в вершине. Глубина кольцевого концентратора меньше продольного, глубина боковых лысок – меньше глубины кольцевых концентраторов. Стабильный разрыв в центре продольного концентратора обеспечивается при его длине не менее 30 мм. Зарождение трещины разрыва начинается в центре продольного концентратора и распространяется в обе стороны по образующей трубы, и только после этого происходит срез по кольцевым концентраторам с раскрытием лепестков дефекта. Боковые лыски выполнены для уменьшения сопротивления открытию лепестков (изгибающий момент уменьшен в 25 раз по сравнению с лепестками без боковых лысок, за счет уменьшения толщины стенки трубы в зоне пластического шарнира). Созданные концентраторы обеспечивают образование дефекта в трубе максимальной площадью 390 мм<sup>2</sup>, что в 1,7 раза больше удвоенной площади проходного сечения трубы 18×3 мм.

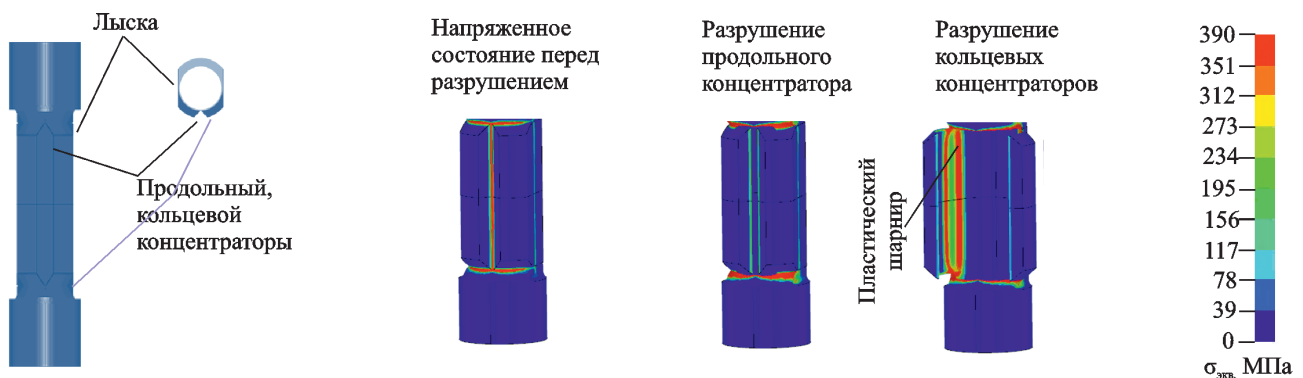


Рис. 9. Выбранная геометрия «Н-образного» концентратора с продольным, двумя кольцевыми пазами и двумя боковыми лысками

Экспериментально был отработан механизм образования дефекта в трубе 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т с «Н-образным» концентратором при действии внутреннего давления. На рис. 10 представлены зависимости разрушающего давления от толщины стенки трубы в продольном концентраторе, полученные численным моделированием и экспериментально.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что для выполнения требований ПМ по давлению разрыва, толщина трубы в продольном концентраторе должна быть 0,22–0,3 мм. При изготовлении отбраковка разрывных труб по минимальному давлению разрыва проводилась гидравлическими испытаниями при 20 °С на воздухе давлением 22 МПа.

На рис. 11 представлена картина расчетного раскрытия выбранного дефекта с учетом падения давления в трубе и вязкого сопротивления жидкого свинца в эксперименте на модельном стенде.

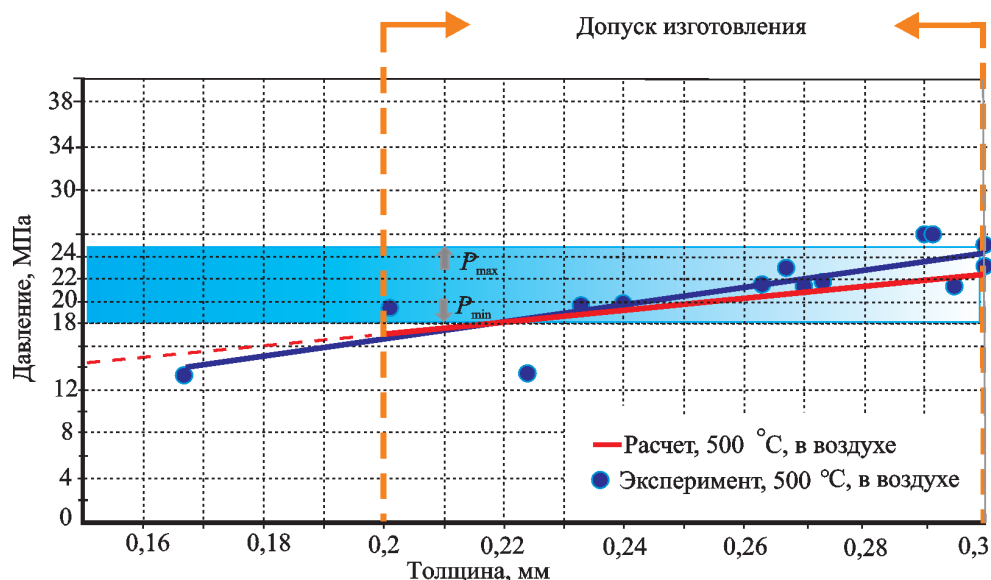


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные значения давления образования дефекта в трубе 18×2,5 мм из стали 12X18H10T в зависимости от толщины трубы в продольном концентраторе

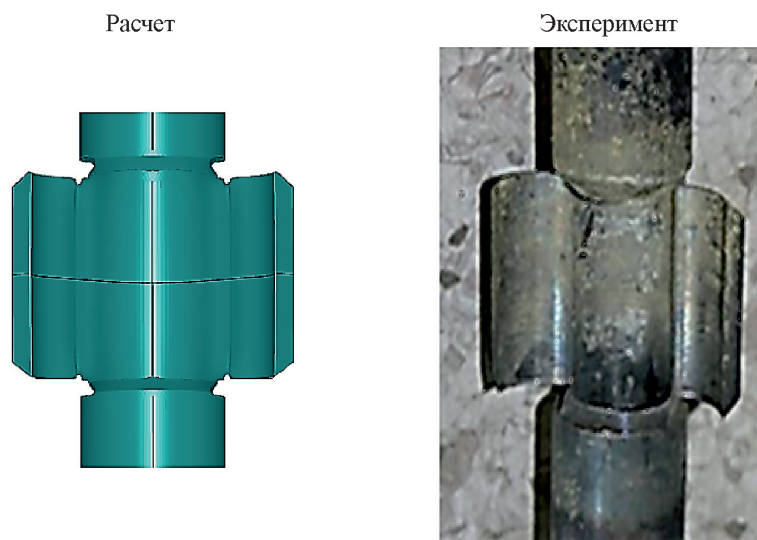


Рис. 11. Раскрытие дефекта  $P_p = 27,3$  МПа

Характер раскрытия дефекта, полученный численным моделированием и в эксперименте, практически не отличается, что говорит о корректном выборе расчетной модели трубы и параметров модели материала.

При разрыве теплообменной трубы площадь дефекта должна быть не менее удвоенной площади проходного сечения трубы 18×3 мм. Таким образом, для того чтобы площадь дефекта удовлетворяла данному требованию, ширина раскрытия лепестков созданного дефекта должна быть более 7,5 мм. В экспериментах на модельном и демонстрационном стендах она, как правило, больше 13 мм.

Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований показал, что раскрытие дефекта в трубе с боковыми лысками в жидком свинце с площадью образуемого дефекта не менее удвоенной площади проходного сечения трубы происходит в момент времени примерно 0,75 мс после разрыва. В момент времени примерно 1,1 мс происходит полное раскрытие созданного дефекта.

Выбранная геометрия концентраторов была применена в экспериментах на модельном и демонстрационном стендах.

## 2.3. Результаты экспериментов на модельном стенде

### 2.3.1. Эксперименты по истечению пароводяной смеси

В накопителе свинец разогревался до температуры  $\sim 520$  °С. В это же время проводился нагрев корпуса стенда и парогенератора до тех пор, пока внутри не достигалось давления заданного значения. Из ПГ пароводяная смесь подавалась в теплообменную трубу. По истечению пароводяной смеси с заданной задержкой проводилась рентгеновская съемка процесса.

В плоском колене стенда проводились эксперименты по барботажу пароводяных пузырей, по разрыву нагружающей трубы и струйному истечению пароводяной смеси. В цилиндрической части стенда – эксперименты по разрыву нагружающей трубы с регистрацией деформаций трубы-мишени. Перед проведением эксперимента со струйным истечением и разрывом трубы в цилиндрической части стенда, исследуемая труба-мишень заполнялась гелием до давления 18 МПа от передвижной газовой лаборатории.

В ходе экспериментов исследовалось пузырьковое истечение пароводяной смеси из предварительно выполненных отверстий 0,5, 1 и 1,5 мм в теплообменной трубе на малых давлениях (до 0,4 МПа). Целью исследований являлось получение рентгенографического изображения пароводяных пузырей при истечении и оценка их параметров. Типичные рентгенограммы представлены на рис. 12.

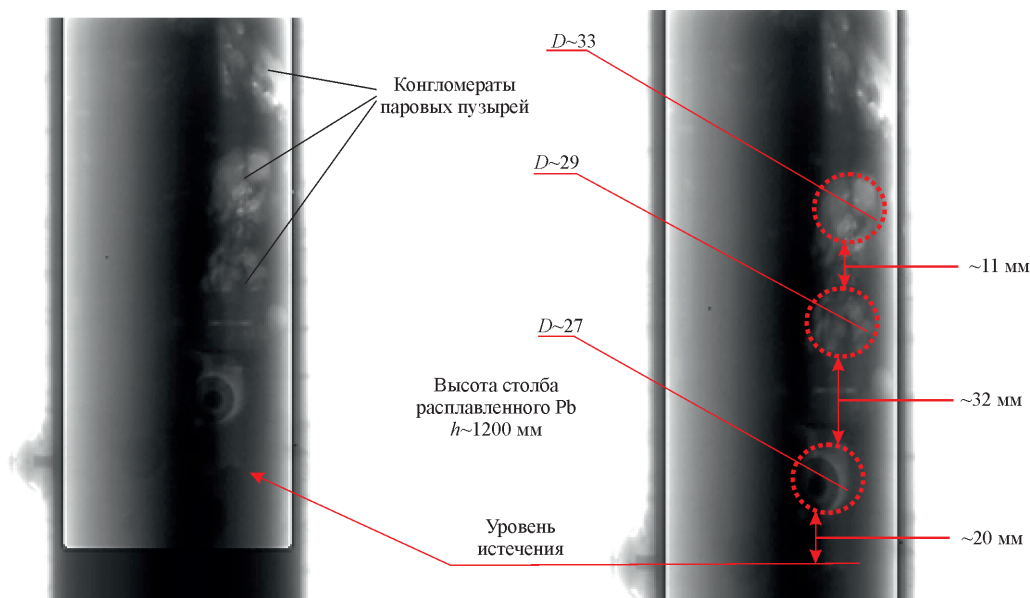


Рис. 12. Рентгенограммы барботажа пароводяных пузырей при давлении в трубе  $P=2$  МПа, диаметре отверстия в стенке трубы 0,5 мм, время регистрации 28 с

На снимке более темные участки соответствуют большей толщине объекта в данной точке, более светлые участки меньшей толщине (подобное распределение толщин справедливо для всех представленных в дальнейшем рентгеновских изображениях).

Минимальное значение давления в трубе, при котором зарегистрировано истечение пароводяной смеси в жидкий свинец, составило  $P=0,15$  МПа. На момент срабатывания рентгеновской установки пароводяная смесь из отверстия истечения сформировала отдельные полости с направленным движением вертикально вверх вследствие естественного вытеснения из более плотной среды (свинец). На рентгенограммах визуальна различима граница пар/свинец, уровень которой практически совпадает с отверстием в трубе, откуда происходит истечение. Значимых величин динамического давления (в диапазоне частот 0,1–3 кГц) в свинце по четырем пьезоэлектрическим датчикам в экспериментах с истечением пара не зафиксировано.

Так же проводились исследования истечения пароводяной смеси из отверстия в теплообменной трубе при давлениях больше 3 МПа. Целью исследований являлось получение рентгенографического изображения струйно-факельного истечения пароводяной смеси, регистрация динамики его развития и оценка параметров образовавшихся полостей по полученным снимкам. Полученные рентгенограммы представлены на рис. 13. Для удобства визуального восприятия изображения зоны истечения 1 рентгенограммы обработаны в специализированной программе [15].

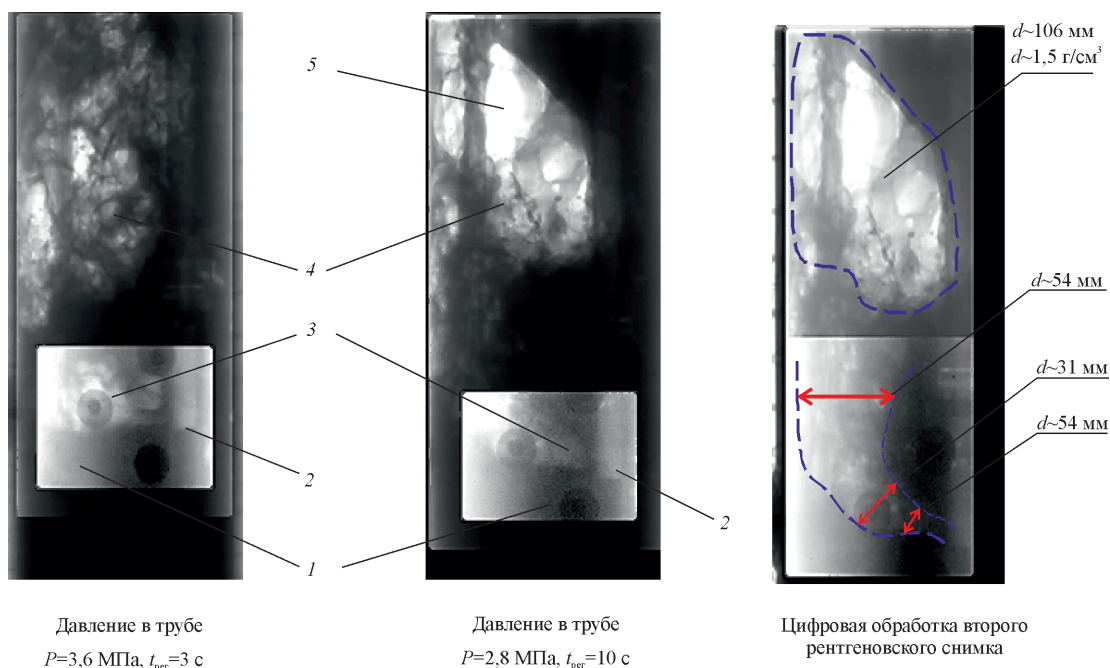


Рис. 13. Типичные рентгенограммы струйно-факельного истечения из трубы с отверстием диаметром 1 мм

В результате на рентгеновских изображениях (рис. 13) зафиксировано струйно-факельное истечение пара 3 через отверстие 2 в свинцовый теплоноситель. При истечении происходит образование полостей и каверн пара 4 в свинце с неупорядоченной геометрией поверхностей их раздела по всему корпусу стенда. Далее происходит образование большого пароводяного пузыря 5, который вытесняет часть свинца вверх корпуса стенда по принципу поршня. По оценке диаметр пароводяного пузыря составляет 106 мм, а его средняя плотность  $\rho = 1,5$  г/см<sup>3</sup>. Высота столба расплавленного свинца над отверстием истечения в первоначальный момент времени составляла 120 мм. Полученная оценка диаметров струйного истечения на разных участках показана на рис. 13. Значимых величин динамического давления в свинце пьезоэлектрическими датчиками давления не зафиксировано.

На рис. 14 представлена рентгенограмма эксперимента в цилиндрической части стенда, проведенного с целью оценки воздействия струи пароводяной смеси, истекающей через отверстие диаметром 1 мм, на трубу-мишень из стали 12Х18Н10Т (межцентровое расстояние между трубами 30 мм). На рентгенограмме зарегистрировано выдавливание жидкого свинца в обе стороны по вертикали относительно зоны истечения с образованием струйного и капельного течений жидкого свинца. Пароводяная струя в этом случае воздействует на исследуемую трубу, практически не окруженную свинцом 1.

На рис. 14 зафиксировано струйно-факельное истечение пара 3 через отверстие 2 в свинцовый теплоноситель. При истечении происходит образование полостей и каверн пара 4 в свинце с неупорядоченной геометрией поверхностей их раздела по всему корпусу стенда. Значимых величин динамического давления в свинце пьезоэлектрическими датчиками не зафиксировано.



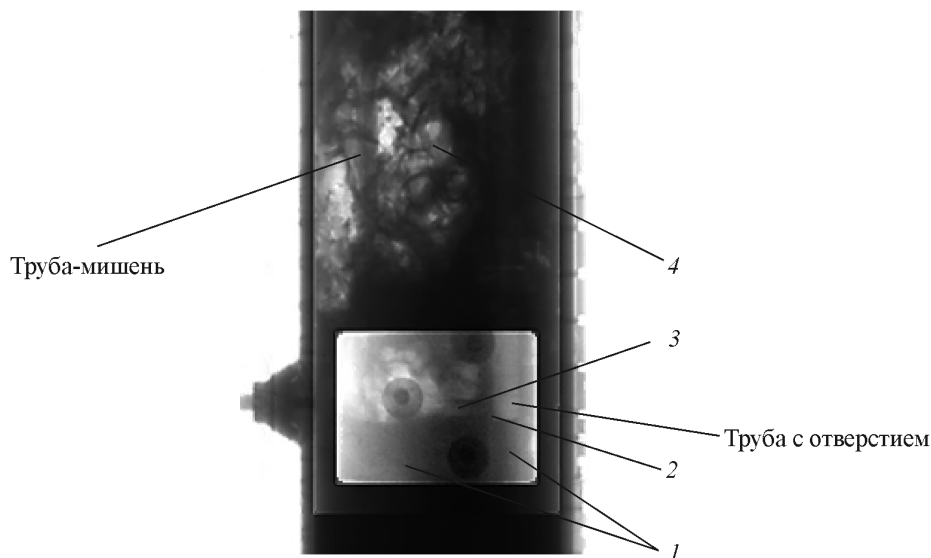


Рис. 14. Типичная рентгенограмма экспериментов на струйно-факельное истечение (диаметр отверстия 1 мм, давление в трубе  $P_{тр} = 18$  МПа,  $t_{пер} = 0,8$  с)

Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах над поверхностью свинца были установлены тензометрические датчики давления, показания которых не приводятся, так как они не показали значений выше 0,3–0,5 МПа.

После проведения эксперимента на трубе-мишени напротив отверстия истечения обнаружен след от воздействия пароводяной струи аналогичный эрозионному пятну с цветами побежалости вокруг него (рис. 15). Максимальная глубина эрозии составила 0,25 мм при давлении в трубе характерном для ПГ (18 МПа).

Следует отметить, что труба-мишень в модельном стенде была изготовлена из стали 12X18H10T, а температура свинца и пароводяной смеси в эксперименте составила соответственно ~520 и ~320 °С.

Численным расчетом была проведена оценка скорости движения пароводяной струи. В эйлеровой постановке численным моделированием была решена задача истечения пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель через отверстие диаметром 1 мм под давлением 18 МПа. Скорость истечения составила ~450 м/с.

В конструкции ПГ подобные последствия нарушения герметичности теплообменных труб снижаются дроссельными вставками, которые ограничивают расход пара по трубе и давление пароводяной среды в месте негерметичности при возникновении течи.

### 2.3.2. Экспериментальное исследование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке

В цилиндрическую часть корпуса стенда при помощи грузоподъемного устройства устанавливались теплообменная и исследуемая (мишень) трубы. Размещение труб представлено на рис. 6 и 16. Разрывная и исследуемая трубы 18×2,5 мм из стали 12X18H10T располагаются с межцентровым расстоянием 30 мм и фиксируются двумя стяжками на расстоянии 900 мм и дистанционирующими решетками. Разрывная труба находится вблизи стенки корпуса, концентраторы сориентированы в сторону трубы-мишени. Труба-мишень в ходе эксперимента находится под давлением гелия 18 МПа (погрешность измерений  $\pm 0,5$  %), постоянно контролируемым пере-

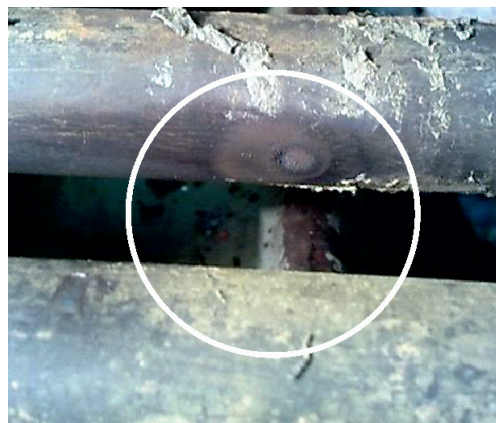


Рис. 15. Результат воздействия пароводяной смеси на трубу-мишень при струйно-факельном истечении

движной газовой лабораторией. Высота столба свинца над местом разрыва 600 мм (равновесное положение свинца в корпусе стэнда).

В ходе экспериментов получали рентгенографические изображения пароводяного пузыря при разрыве теплообменной трубы, отслеживали динамику его развития. По установленным датчикам (рис. 16) регистрировали изменение давления в свинце и меридиональную деформацию трубы-мишени напротив нагружающего разрыва и вблизи опоры трубы.

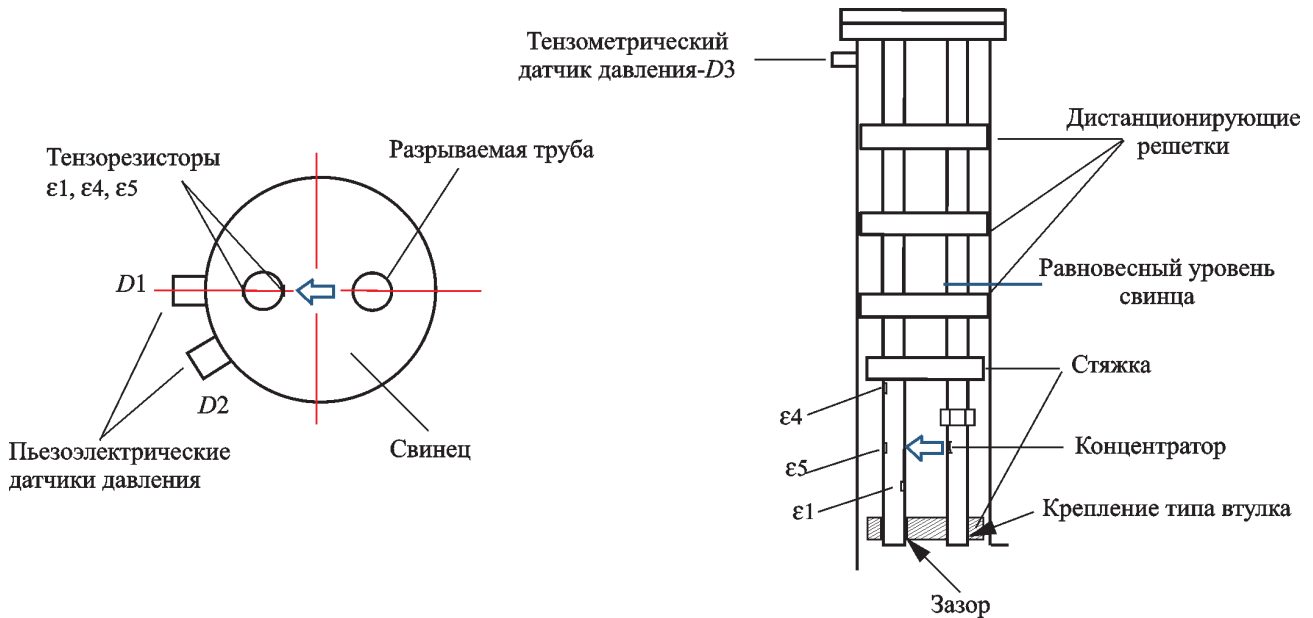


Рис. 16. Схема размещения датчиков

В момент разрыва трубы пьезоэлектрические датчики давления ДПС-012 ( на рис. 16  $D1, D2$ ) фиксируют динамически изменяющееся давление у корпуса стэнда на диаметре 94 мм (погрешность измерений  $\pm 8\%$ ). При достижении давления 10 МПа (датчик  $D2$ ) запускается блок синхронизации, который через 3 мс подает сигнал на срабатывание рентгеновской установки. Время задержки было выбрано по результатам численного моделирования в лагранжево-эйлеровой постановке на упрощенных моделях истечения пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель при разрыве трубы при давлении 18 и 25 МПа. При этом отслеживалось, чтобы образующийся пузырь охватывал исследуемую трубу (рис. 17) с учетом различия темпа развития давления в паросвинцовой среде при разрыве трубы в расчетной модели (рис. 18) и реальной конструкции.

Размер пароводяной полости в расчете составил:  $A \approx 88$  мм,  $B \approx 53$  мм.

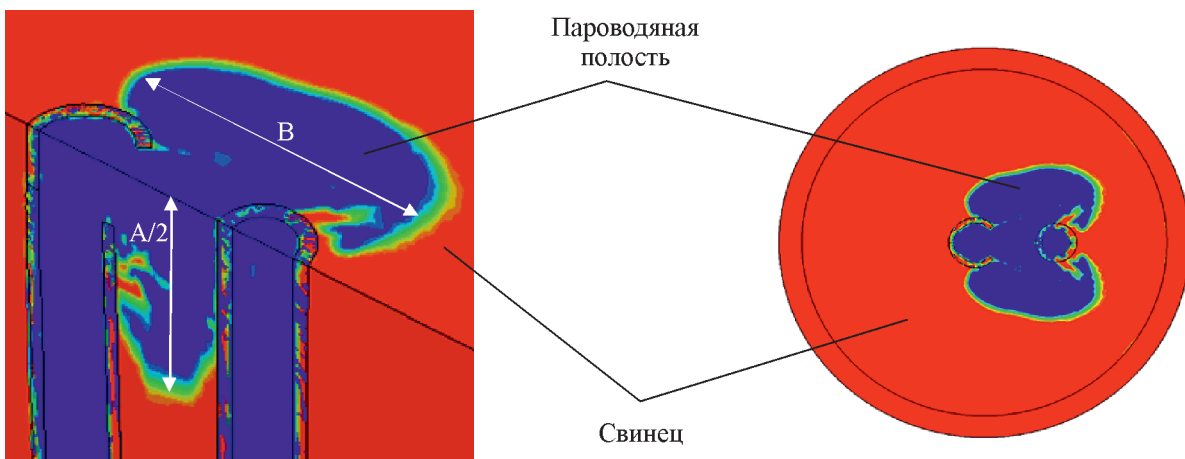


Рис. 17. Развитие пароводяного пузыря в свинце при разрыве трубы при давлении 25 МПа

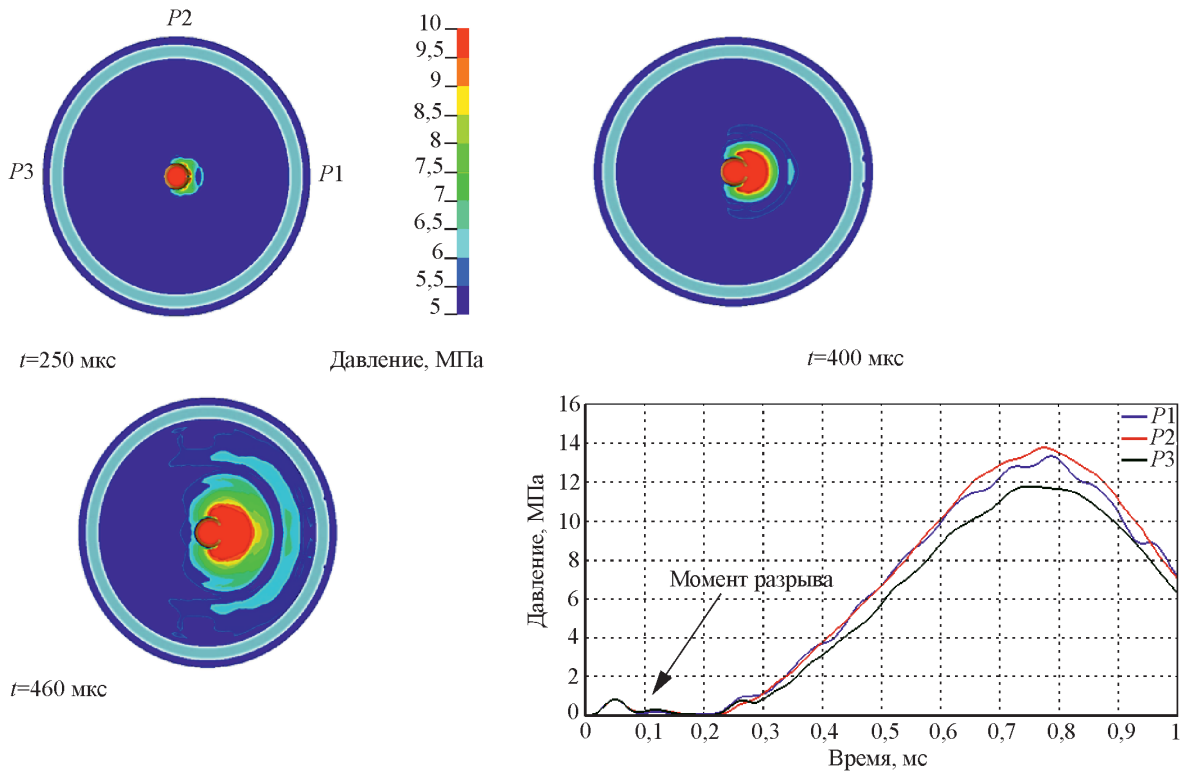


Рис. 18. Распределение давлений в паро-свинцовой среде при разрыве трубы при давлении 18 МПа

На рис. 19 представлена типичная рентгенограмма экспериментов на разрыв с полным открытием дефекта.

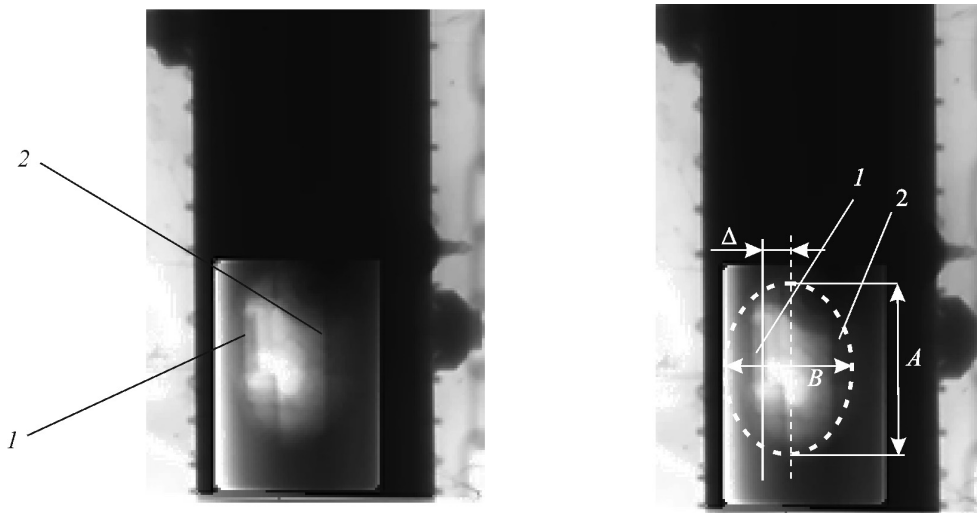


Рис. 19. Рентгенограмма эксперимента на разрыв трубы:  $P_p=27,3$  МПа;  
 ---- граница полости пароводяной смеси; 1 – открывшиеся лепестки концентратора; 2 – труба-мишень

Давление в трубе на момент разрыва (до рентгенографирования) составило в первом случае  $P_p=27,3$  МПа, во втором  $P_p=18,3$  МПа.

В проведенных экспериментах рентгеновской установкой зафиксированы осесимметричные полости пароводяной смеси. Размеры пароводяной полости составили: в первом случае  $A \approx 86$  мм,  $B \approx 54$  мм,  $\Delta \approx 16,0$  мм, во втором случае  $A \approx 97$  мм,  $B \approx 47$  мм,  $\Delta \approx 5,5$  мм. На рентгенограмме (рис. 19) хорошо различимы открывшиеся лепестки концентратора 1, труба-мишень 2. Полученные экспериментальные результаты согласуются с результатами предварительного численного моделирования.



В эксперименте при разрыве трубы давлением 18,3 МПа была отработана регистрация возникающего динамического давления в свинце на внутренней поверхности корпуса пьезоэлектрическими датчиками ДПС 012 (рис. 16  $D1$ ,  $D2$ ), было получено значение максимального динамического давления равное (14–15) МПа, что меньше давления разрыва трубы (рис. 20). Факт снижения давления на радиусе корпуса согласуется с проведенными численным моделированием разрыва одиночной трубы в свинце (рис. 18) при давлении разрыва 18 МПа. В эксперименте были зарегистрированы деформации трубы-мишени тензорезисторами  $\varepsilon 1$ ,  $\varepsilon 4$ ,  $\varepsilon 5$  (рис. 16) находящимися в жидком свинце (рис. 20) на исследуемой трубе-мишени.

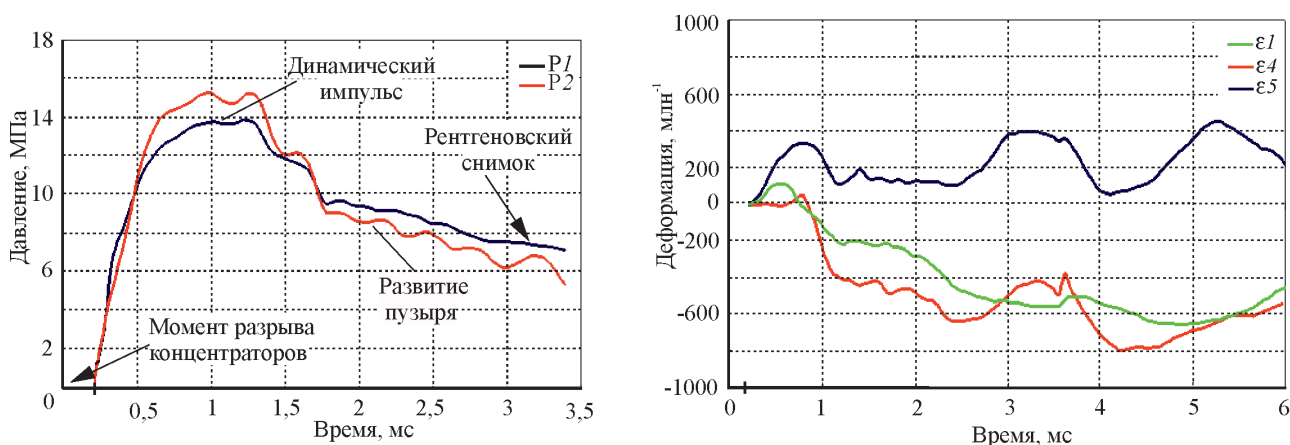


Рис. 20. Изменение динамического давления в свинце вблизи корпуса стэнда при разрыве трубы давлением 18,3 МПа и деформации трубы-мишени, зарегистрированные тензорезисторами

Как видно из рис. 20 меридиональная деформация трубок, вызванная воздействием динамического давления и пароводяного пузыря, не превышает по абсолютной величине  $800 \text{ млн}^{-1}$  и лежит в упругой области деформирования материала ( $1400 \text{ млн}^{-1}$  – условный предел упругости  $\varepsilon_{0,05}$  стали 12X18H10T при температуре  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Анализ результатов эксперимента показал, что пьезоэлектрические датчики ДПС-012 позволили зафиксировать фронт нарастания давления в жидком свинце, пик импульса давления и начало развития пароводяного пузыря (рис. 20). Тензорезисторы зафиксировали основной наиболее напряженный момент деформации трубы-мишени.

После проведения всех экспериментов исследуемая труба в нормальных условиях была нагружена внутренним давлением  $P_{\text{пров}} = 30 \pm 1 \text{ МПа}$ . При действии проверочного давления  $P_{\text{пров}}$  прочность трубы сохранилась (рис. 21).



Рис. 21. Вид трубы-мишени 18×2,5 мм из стали 12X18H10T после испытаний в жидком свинце ( $520 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Остаточных деформаций и изменения геометрии исследуемой трубы после всех испытаний не зарегистрировано.

### 2.3.3. Выводы

В экспериментах показана возможность визуализации с использованием рентгенографической установки, работающей в режиме ожидания, динамических процессов, которые происходят при взаимодействии пароводяной смеси с жидким свинцом при авариях, связанных с нарушением герметичности и прочности теплообменных труб ПГ РУ типа БРЕСТ.

В **консервативной постановке** эксперимента показана **невозможность перерастания одиночного разрыва во множественный в трубном пучке ПГ РУ типа БРЕСТ** табл. 3.

Формируемый разрыв в трубе был в 1,7 раз больше требуемого по ПМ дефекта (не менее удвоенной площади проходного сечения трубы 18×3 мм). Численное моделирование показало, что труба-мишень под действием ударной нагрузки изгибается. Величина прогиба зависит от погонной силы, приходящейся на мишень. Чем больше давление разрыва и длина дефекта, тем большая нагрузка приходит на трубу-мишень. Прочность исследуемой трубы-мишени 18×2,5 мм из стали 12X18H10T в экспериментах при температуре 500°С практически в два раза меньше, чем трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш. Межцентровое расстояние между трубой-мишенью и разрываемой трубой на 3 мм меньше, чем в ПГ. Расстояние между местами закрепления трубы-мишени (900 мм) больше штатного. Труба-мишень четырежды нагружалась в ТЖМТ динамическим воздействием при разрыве трубы.

Таблица 3

Проведенные эксперименты в модельном стенде с разрывом трубы и трубой-мишенью 18×2,5 мм из стали 12X18H10T

Эксперимент	1	2	3	4
Давление разрыва $P_p$ (тензометрический датчик типа GEFRAK K32), МПа	13,4	21,5	18,3	27,3
Максимальное значение пикового давления в свинце у корпуса стенда $P_d$ (пьезоэлектрический датчик типа ДПС-012), МПа	–	–	13,2-15,0	–
Максимальная деформация трубы-мишени (тензорезистор типа АWH), млн <sup>-1</sup>	–	–	800	–
Высота столба свинца над разрывом, мм			600	

## 3. Демонстрационный стенд для экспериментального обоснования безопасности ПГ РУ типа БРЕСТ при разгерметизации теплообменных труб

### 3.1. Конструкция демонстрационного стенда

В соответствии с требованиями ПМ на демонстрационные эксперименты был разработан и изготовлен исследовательский стенд P066-M4 с зоной исследований высотой 4400 мм и диаметром 160 мм. Рабочий участок стенда представляет собой U-образный сосуд (корпус стенда с крышками), заполняемый расплавленным свинцом. Выбранная конфигурация корпуса обеспечивает движение жидкого свинца в двух направлениях в момент взаимодействия пароводяной смеси со свинцом.

Общий вид стенда показан на рис. 22 и 23.

Рабочее положение корпуса стенда – вертикальное. Газовая система стенда позволяет задавать перед экспериментом перепад уровней свинца в рабочем и технологическом коленах стенда. Высота столба свинца над разрываемым дефектом в рабочем колене стенда в экспериментах составляла ~ 3000 мм. В равновесном положении высота столба свинца над разрываемым

дефектом составляла 2000 мм. Для замены петли с концентратором и в режиме расхолаживания стенд переводится в горизонтальное положение (рис. 23).

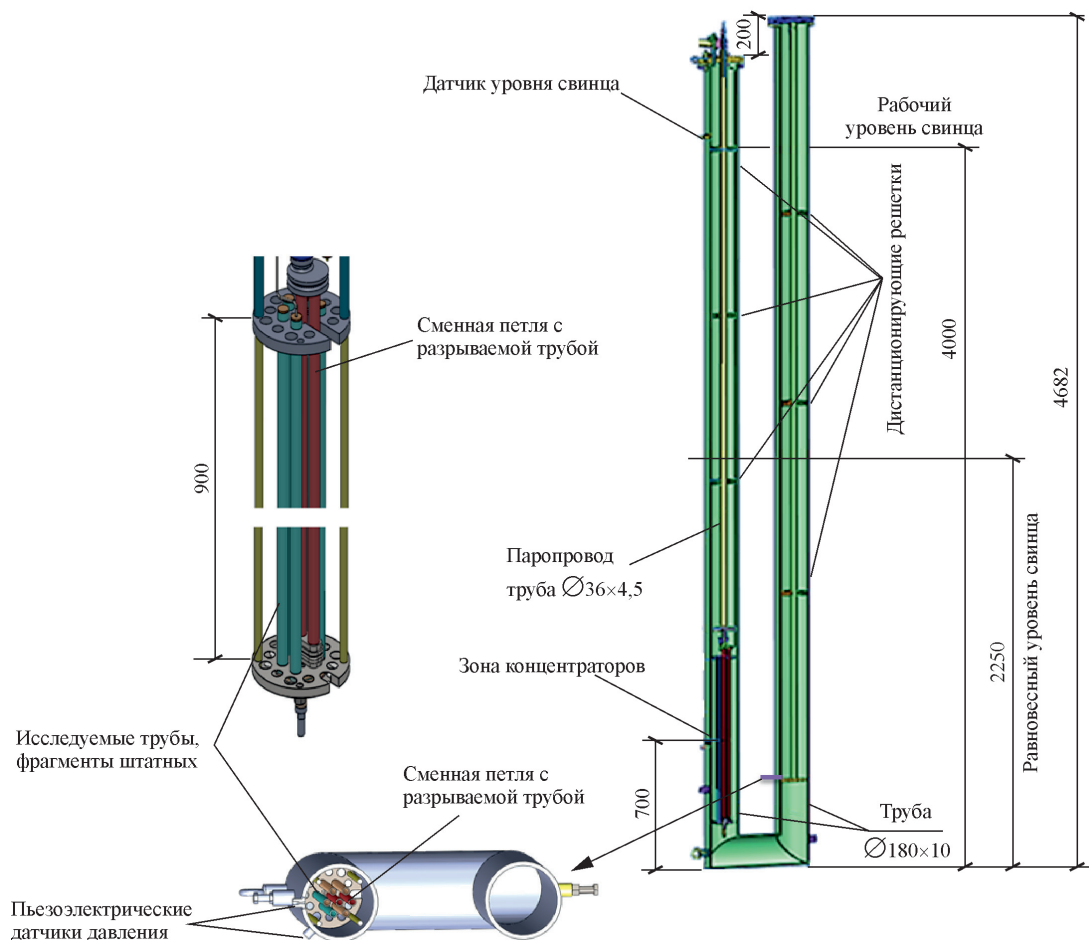


Рис. 22. Общий вид элементов демонстрационного стенда

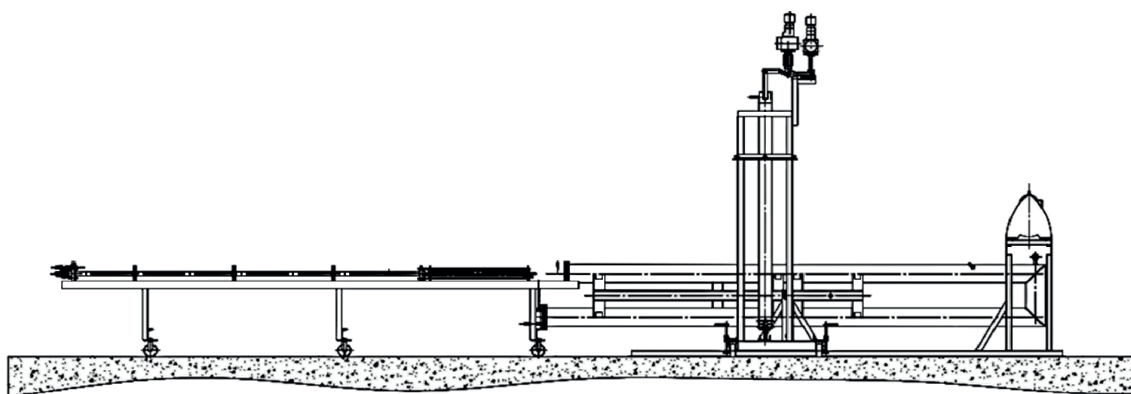


Рис. 23. Корпус и трубная секция стенда в горизонтальном положении

В начале эксперимента после разогрева корпуса стенда и свинца до температуры 500–550 °С стенд переводился в вертикальное положение, в технологическое колено подавался аргон до срабатывания датчика уровня свинца в рабочем колене.

Пучок теплообменных труб для исследования возможности их зависимого разрыва выполнен с шагом равному штатному и во время эксперимента исследуемые трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш, находятся под постоянно контролируемым давлением 18 МПа (погрешность измерений ±0,5 %). Закрепление исследуемых труб осуществляется с двух концов (как это имеет ме-

сто в конструкции ПГ). Расстояние между опорными решетками исследуемых труб 900 мм, одно закрепление типа «заделка», другое – типа «втулка», место разрыва теплообменной трубы находилось на расстоянии 450 мм от «заделки» исследуемых труб.

Разрываемая и одна из исследуемых труб объединены в петлю для обеспечения подвода пароводяной смеси к разрыву с двух сторон. Петля с разрываемой трубой 18×2,5 мм из стали 12X18H10T с Н-образным концентратором в фрагменте трубного пучка выполнена сменной.

Исследователи в работе [10] отмечают, что при разрыве трубы ПГ в формировании нагрузки на соседние в пучке трубы участвует только часть пароводяной смеси, находящейся внутри трубы в непосредственной близости от места разрыва. Были выполнены упрощенные (2D-модель) расчеты распределения вектора скорости пароводяной смеси при истечении в свинец из дефекта разрывающейся трубы в петле стенда (рис. 24). Первые 6–8 мс расход пароводяной смеси в разрыв в петле идет по двум подводящим трубам, что является достаточным для формирования воздействия на исследуемые трубы. После 11 мс пароводяная смесь в расчете подходит к разрыву от паропровода практически только по одной трубе в разрывающейся части петли.

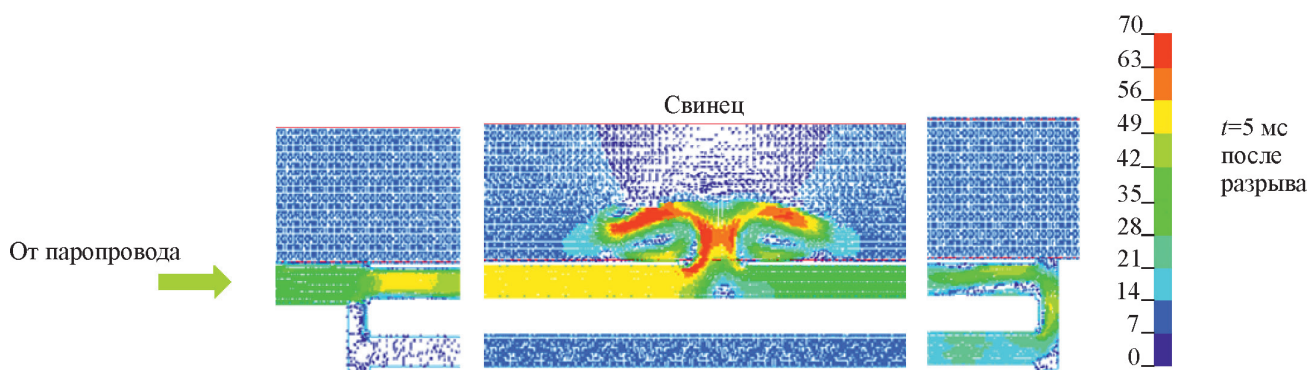


Рис. 24. Распределение вектора скоростей (м/с) пароводяной смеси при истечении из дефекта в свинец

После монтажа и проведения пусконаладочных испытаний (без свинца) в технологическое колено U-образного корпуса стенда было загружено около 1200 кг свинца, используемого в качестве имитатора теплоносителя.

В целях упрощения проведения экспериментов модуль подготовки пара в демонстрационном стенде не использовался. Пароводяная смесь создавалась непосредственно в паропроводе порционной подачей воды насосом через гидрокамеру в нагретое входное колено паропровода.

Паропровод и насадка с концентратором находятся в расплавленном свинце с температурой 500–550 °С. За счет тепла расплавленного свинца вода нагревается и превращается в пар. Согласно «i–S» диаграммы состояния водяного пара, вода не может иметь температуру более 370 °С, соответствующую критическому состоянию воды. Замеряемая в экспериментах температура среды в паропроводе  $\approx 500$  °С, показывает, что в трубе находится перегретый водяной пар.

В проводимых исследованиях из-за невозможности независимого разрыва в трубном пучке использовали два различных пучка труб-мишеней (рис. 25) – цельных и ослабленных с имитацией фреттинг-износа или дефекта при изготовлении (по внешней поверхности трубы-мишени в зоне разрыва выполнялись лыски глубиной 2 мм). От пучка труб до корпуса стенда оставалось  $\sim 40$  мм, заполненных расплавленным свинцом.

На каждом этапе испытаний для замедления процесса окисления теплоносителя полость U-образного корпуса перед нагревом заполнялась аргоном.

В демонстрационном стенде было проведено четыре эксперимента с разрывом нагружающей трубы (табл. 4). Каждый из созданных фрагментов трубного пучка в составе демонстрационного стенда дважды был нагружен динамическим давлением от разрывающейся трубы.

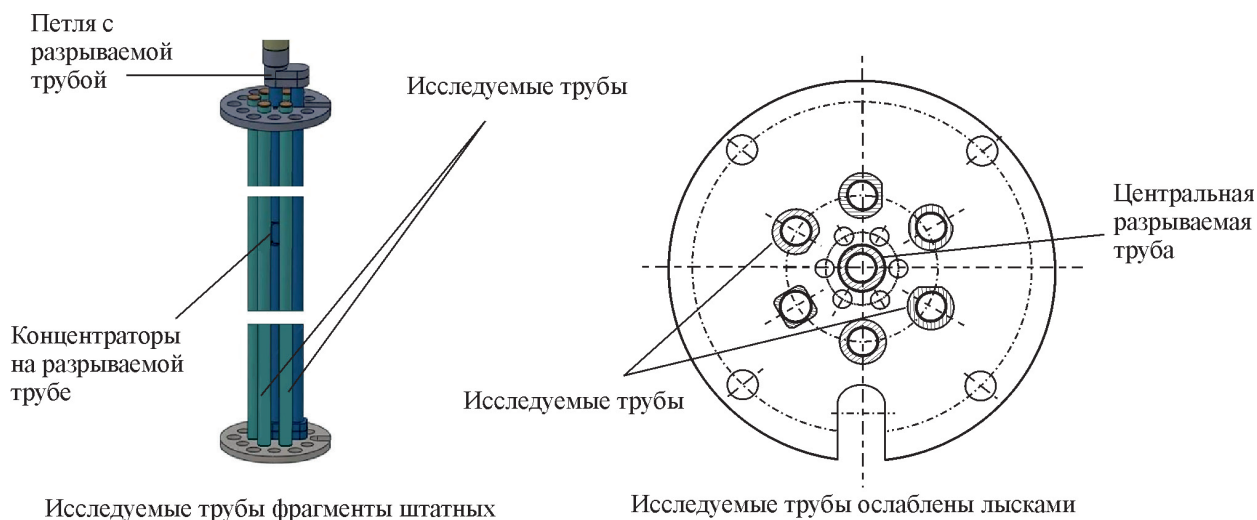


Рис. 25. Блок исследуемых трубок

Таблица 4

Проведенные эксперименты с демонстрационным стендом с разрывом трубы 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т и трубным пучком-мишенью 18×3 мм из стали ЭП302-Ш

Эксперимент (дата)	19.02	28.02	12.03	18.03
			Трубы, ослабленные лыской	
Давление разрыва $P_p$ пароводяной смеси в момент раскрытия концентраторов (тензометрический датчик типа GEFRAN K32), МПа	25,1	24,3	24,9	14,4
Пиковое динамическое давление у корпуса стенда в свинце $P_d$ на фронте воздействия (пьезоэлектрический датчик типа ДПС-012), МПа	25,4*	13,6*	15,0–28,0	7,0–18,0
Высота столба свинца над разрывом не менее, мм	3000			

\* – был установлен один датчик динамического давления

### 3.2. Экспериментальное исследование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке

На рис. 26 представлены полученные в экспериментах давления в свинце у стенки U-образного сосуда (диаметр 160 мм) в зоне истечения пароводяной смеси в свинцовый теплоноситель. Кривые давления в эксперименте 12.03 соответствуют давлению разрыва нагружающей трубы, равного 24,5–25 МПа; кривые давления в эксперименте 18.03 – давлению разрыва 14,4 МПа; кривая давления в эксперименте 19.02 – давлению разрыва 23–24 МПа; кривая давления в эксперименте 28.02 – давлению разрыва 24,8 МПа.

В экспериментах на демонстрационном стенде на графиках давления наблюдаются кратковременные пики на фронте волны динамической нагрузки. Их можно связать с другим способом создания пароводяной смеси в разрываемой трубе: в момент разрыва в паре находится большее количество капель воды, по сравнению с экспериментами на модельном стенде. В начальный момент динамического взаимодействия истекающей пароводяной смеси происходит взрывное расширение капелек перегретой воды (флеш-испарение), попадающих в свинец. Пучок исследуемых труб вокруг разрываемой трубы работает как «корпус» с шестью пазами. За исследуемым трубным пучком происходит турбулентное перемешивание большого количества свинца и интерференция создаваемого динамического воздействия в свинце, поэтому амплитудные значения давления, регистрируемые пьезоэлектрическими датчиками, отличаются друг от друга. После разрыва центральной трубы в пучке исследуемые трубы, расположенные по



окружности от центральной трубы, нагружаются импульсом давления, аналогичного импульсу давления который в подобных условиях может реализоваться в ПГ (шаг трубного пучка в исследованиях равен штатному; закрепление труб-мишеней – штатное; расстояние между зонами крепления трубок в эксперименте немного больше штатного). В момент после разрыва дефекта исследуемые трубы в течение 0,5–0,7 мс нагружаются динамическим давлением. Далее от ~0,7 мс до 2,0 мс – импульсами давлений, связанными с движением свинца и пароводяного пузыря внутри трубного пучка и отраженного возмущения от корпуса. После 5–6 мс нагрузка определяется формируемым по сечению корпуса стенда пароводяным пузырем, который начинает вытеснять свинец по U-образному корпусу демонстрационного стенда.

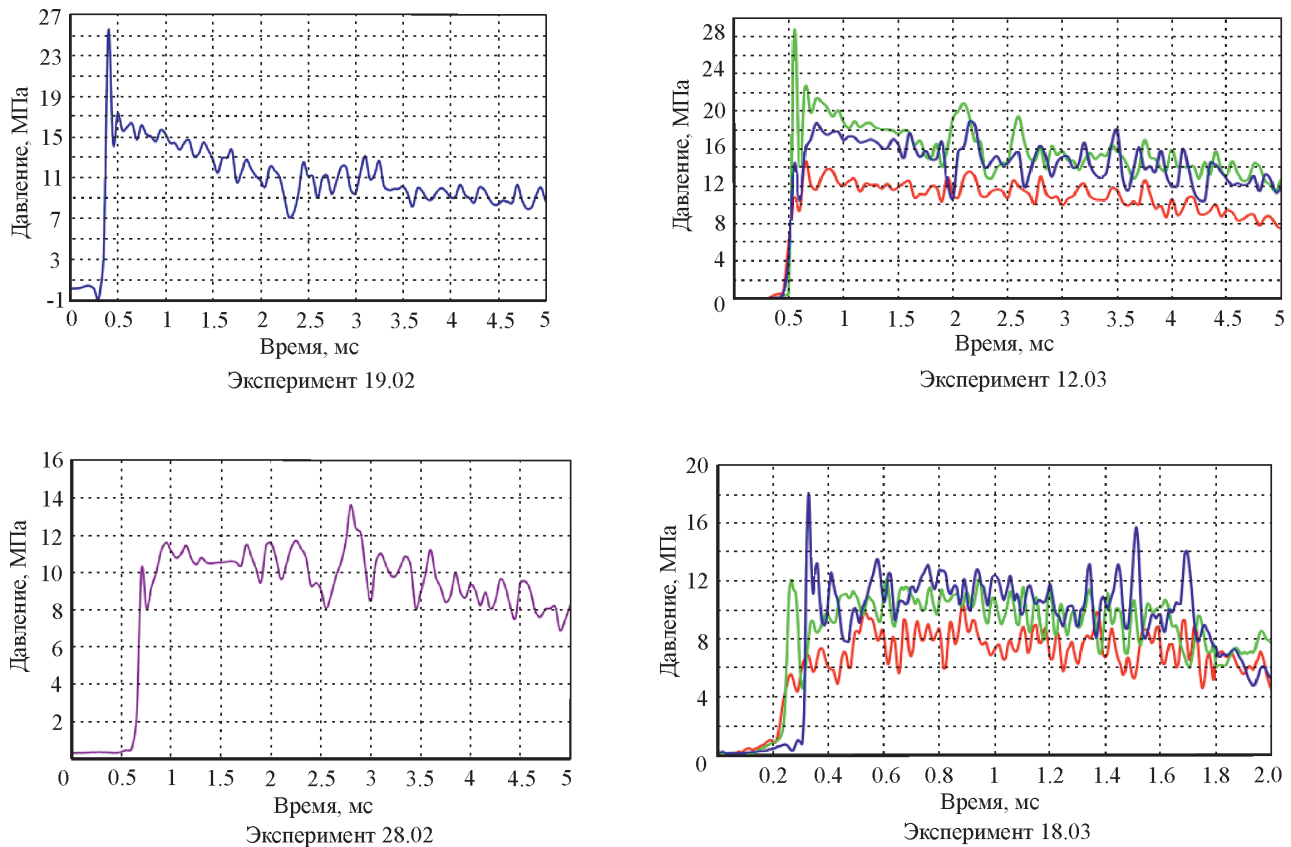


Рис. 26. Изменение давлений в рабочей зоне демонстрационного стенда

Временной сдвиг (задержка) сигнала одного из пьезоэлектрических датчиков в эксперименте 18.03 и различная динамика, регистрируемая датчиками, подтверждает наличие турбулентного перемешивания свинца и интерференцию создаваемого динамического воздействия за пределами исследуемого трубного пучка (полученные в предварительных расчетах).

Наличие «свободного» объема свинца за пучком труб увеличивает время прихода отраженной волны давления от корпуса стенда на исследуемые трубы по сравнению со случаем, если бы за трубами-мишенями находился еще один ряд труб. То есть в стенде исследуемые (крайние) трубы в пучке должны более интенсивно деформироваться по сравнению с трубами ПГ, находящимися в глубине пучка.

Проведенное предварительное численное моделирование поведения исследуемых труб (НДС) показало, что датчики деформации на исследуемых трубах нужно установить в зоне заделки, в зоне истечения пароводяной смеси, на четверти высоты трубы, выше и ниже зоны истечения (рис. 27). Для этих областей численным моделированием получены максимальные деформации, имеющие наибольший размах их изменения во времени (от  $\varepsilon_{\min}$  до  $\varepsilon_{\max}$ ).

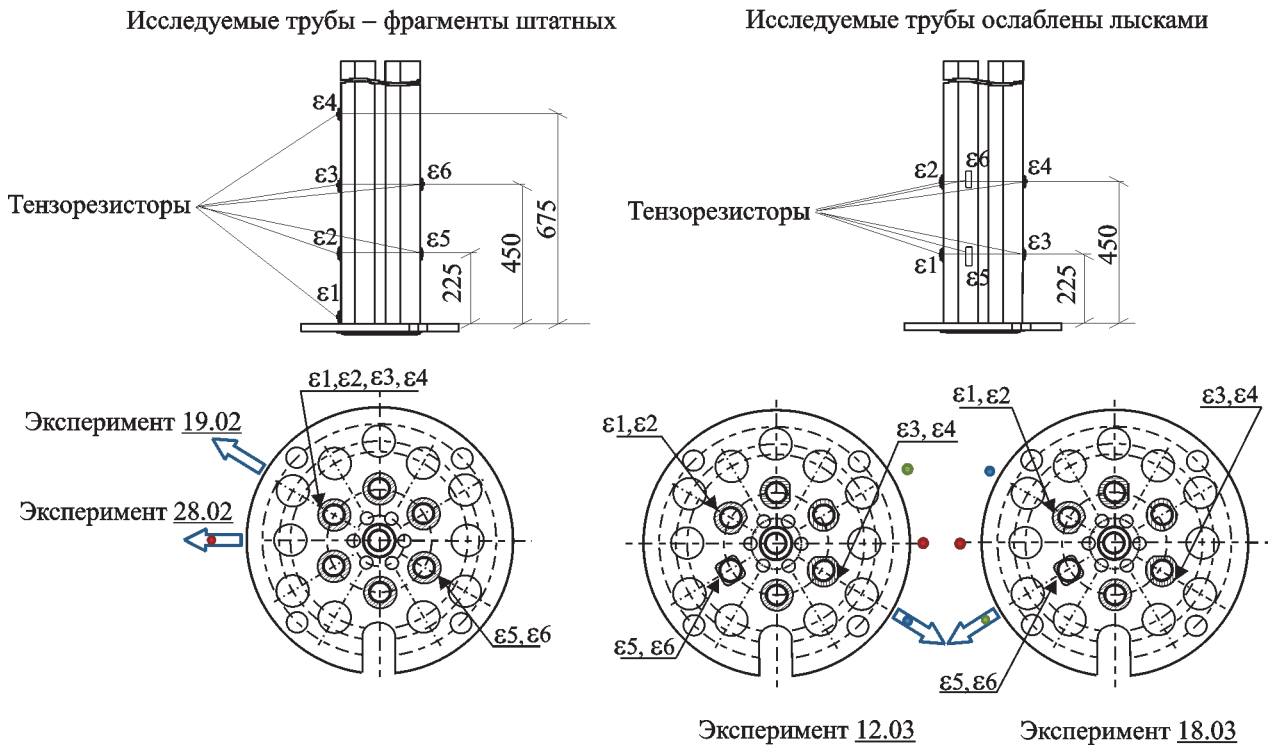


Рис. 27. Схема установки тензорезисторов и датчиков давления на исследуемом блоке:

• – D1; • – D2; • – D3;  $\leftarrow$  – направление истечения пароводяной смеси

Зарегистрированные в экспериментах характерные деформации исследуемых труб приведены на рис. 28 и табл. 5.

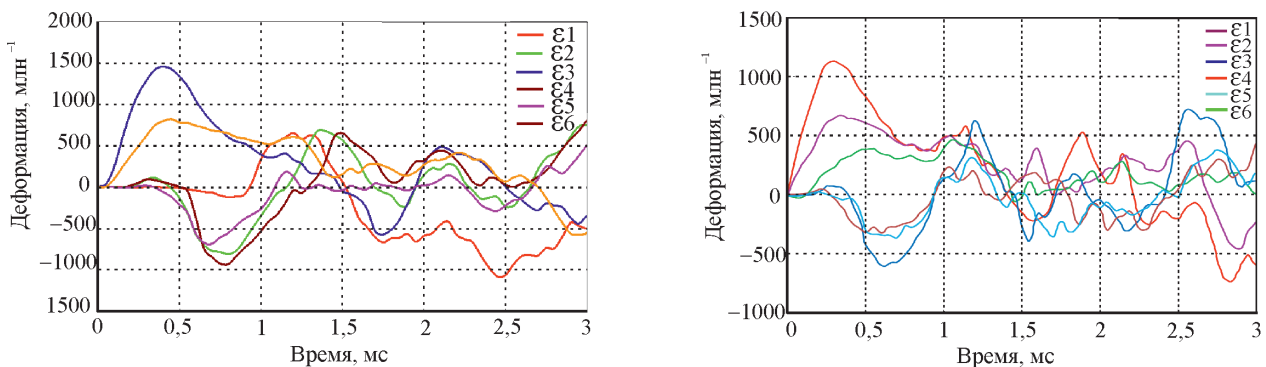


Рис. 28. Характерные меридиональные деформации труб-мишеней в пучке

Практически за время 0,25 мс все трубы вокруг разрываемой трубы в трубном пучке подвергаются динамическому воздействию в зоне разрыва.

Для иллюстрации последовательности протекающих динамических процессов на рис. 29 в одном временном интервале приведены графики динамического давления, зарегистрированные у корпуса стенда, и меридиональные деформации, возникающие в трубах-мишенях. Из анализа графиков видно, что в эксперименте 19.02 волна давления доходит до корпуса стенда в направлении истечения после прохождения труб-мишеней через 0,25 мс, а в эксперименте 12.03 – через 0,2 мс (точка К).

Таблица 5

Значения параметров зарегистрированных в экспериментах с демонстрационным стендом

Эксперимент (дата)	19.02	28.02	12.03	18.03
Тип трубы	Штатные трубы		Трубы, ослабленные лыской	
Максимальное значение пикового давления в свинце у корпуса стенда (пьезоэлектрический датчик ДПС-012), МПа	25,2*	13,5*	15,9–28.5	9,8–18.1
Максимальная деформация трубы-мишени перед разрываемыми концентраторами (тензорезистор типа АWH), млн <sup>-1</sup>	1400	1150	1200	1100
Максимальная деформация трубы-мишени за разрываемыми концентраторами (тензорезистор типа АWH), млн <sup>-1</sup>	1130	1000	1000	–
Изменение температуры в свинце в зоне исследования до разрыва / после разрыва (низкоинерционная термопара типа КТХА 01.02-002-к1-Н-Т310-0,5), °С	500/485	520/510	–	500/475
Максимальное значение окружных деформаций корпуса стенда в зоне разрыва (тензорезистор типа АWH), млн <sup>-1</sup>	500	670	380	–
Пик давления над поверхностью свинца после разрыва в рабочем колене / технологическом колене (тензометрический датчик типа GEFRAN K32), МПа	3,79/2,3	5,5/4,8	2,4/1,4	4,7/3,5
Температура над поверхностью свинца в рабочем колене до разрыва / после разрыва (низкоинерционная термопара типа КТХА 01.02-002-к1-Н-Т310-0,5), °С	490/(500-475)	490/470	–	440/490
Температура над поверхностью свинца в технологическом колене до разрыва / после разрыва (низкоинерционная термопара типа КТХА 01.02-002-к1-Н-Т310-0,5), °С	450/500	470/465	–	400/490
Температура в паропроводе до разрыва / после разрыва (время действия пониженной температуры) (низкоинерционная термопара типа КТХА 01.02-002-к1-Н-Т310-0,5), °С	500/200 (15 сек)	520/275 (10 сек)	–	500/240 (9 сек)

\* – был установлен один датчик динамического давления

Анализ результатов экспериментов показывает, что наиболее нагруженной является исследуемая труба, расположенная перед разрывом. Максимальная достигнутая деформация трубы в экспериментах равна 0,0014 ед., что меньше деформации, соответствующей условному пределу упругости стали ЭП302М-Ш при температуре 500 °С, равному 0,0021 ед.

В ходе экспериментов исследуемые трубы были подключены к передвижной газовой лаборатории и находились под давлением 18 МПа (погрешность измерения давления  $\pm 0,5$  %). Падения давления в исследуемых блоках не зарегистрировано.



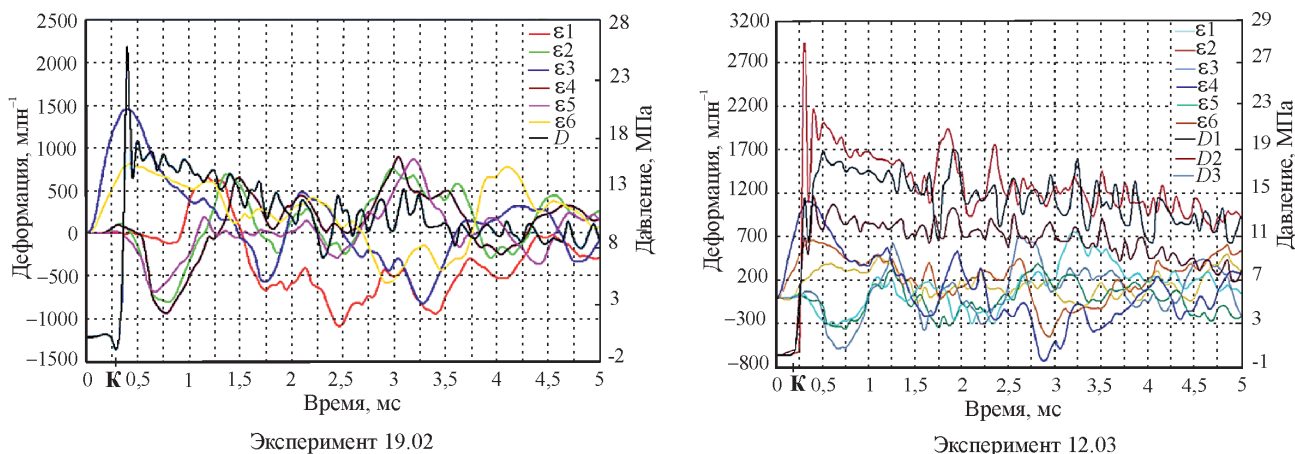


Рис. 29. Прохождение динамического возмущения в рабочей зоне стенда

Трубы исследуемых блоков сохранили свою геометрию и прочность (рис. 30). В ходе экспериментов наблюдался выброс свинца под крышками корпуса стенда.

После проведения всех экспериментов исследуемые блоки трубок в нормальных условиях были нагружены внутренним давлением  $P_{\text{пров}} = 30 \pm 1$  МПа. При действии проверочного давления  $P_{\text{пров}}$  прочность трубок сохранилась.

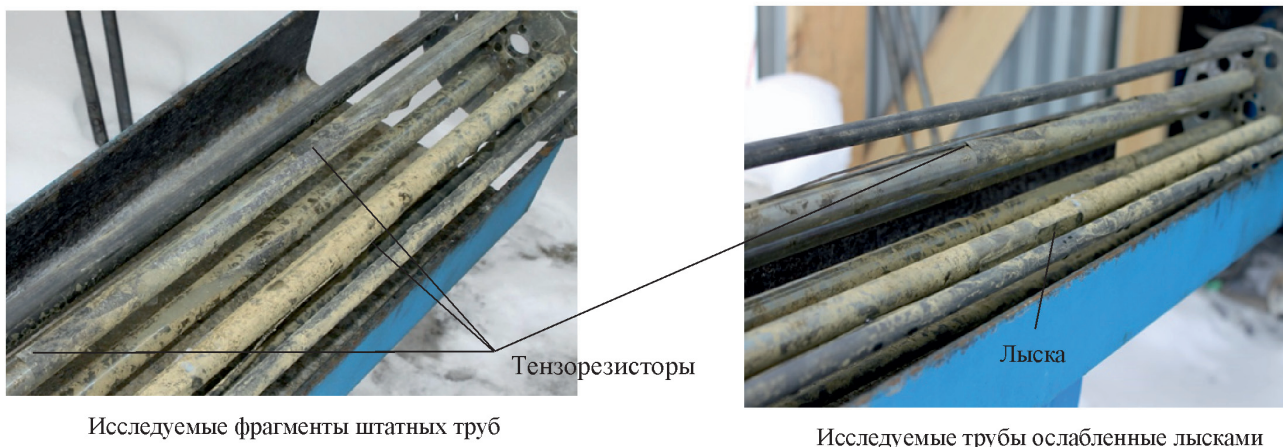


Рис. 30. Исследуемый блок труб после всех нагружений

### 3.3. Численное моделирование протекающих процессов при разрыве одной из теплообменных труб в трубном пучке

Численное моделирование воздействия на мишень динамического давления и процесса истечения пароводяной смеси в теплоноситель проводилось в лагранжево-эйлеровой постановке. Моделировалась разрываемая теплообменная труба  $18 \times 2,5$  мм, выполненная из стали 12X18H10T, и одна исследуемая труба-мишень – из стали ЭП302М-Ш. В расчетах были рассмотрены два варианта исследуемых труб: круглые  $18 \times 3$  мм и с заданием внешнего дефекта на исследуемой трубе в зоне истечения (лыска глубиной 2 мм, дефект ориентирован так, что находится в зоне наибольшего растяжения при изгибе трубы в результате динамического удара).

На рис. 31 показана выбранная упрощенная лагранжевая модель (твердотельная среда) рабочего участка демонстрационного стенда, все элементы модели находятся в эйлеровой среде (вязкая среда (свинцовый-теплоноситель) – красный контур). Пароводяная среда моделировалась идеальным газом. Все элементы модели имеют постоянную температуру  $500$  °С.

На рис. 32 представлены кривые изменения давления в рабочей зоне U-образного сосуда. Давление разрыва трубы составляет 25 МПа. Рассмотрено три случая: положение свинца соот-

ветствует заданному в ПМ (питающий объем пароводянной смеси 16 л и 1,4 л) и равновесное положение свинцового теплоносителя (питающий объем пароводянной смеси 1,4 л).

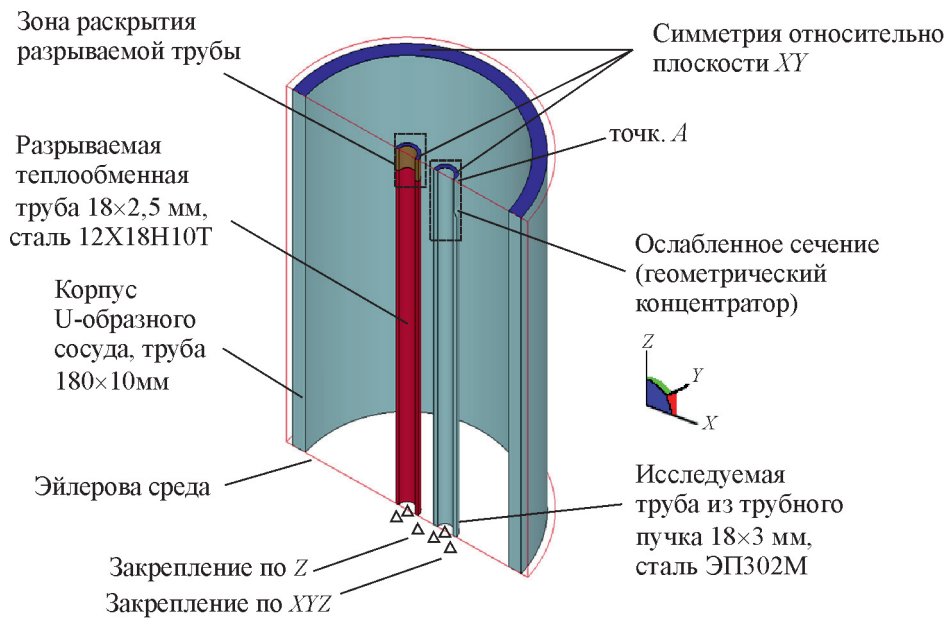


Рис. 31. Расчетная схема

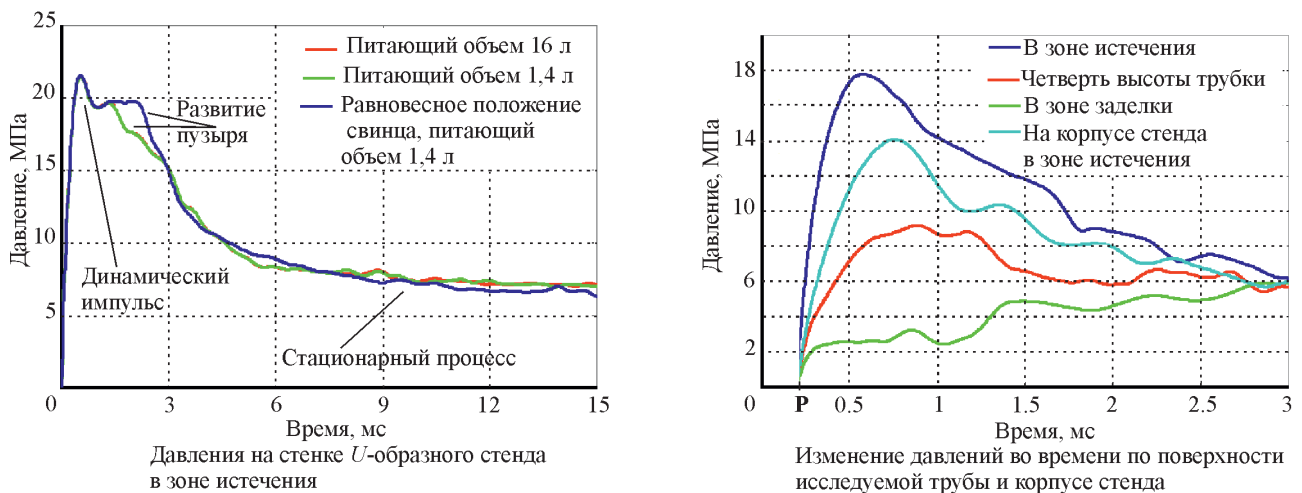


Рис. 32. Изменение давлений во времени:  
давление разрыва трубы 25 МПа;  $P$  – раскрытие дефекта (0,2 мс)

Как видно из рис. 32, динамический процесс истечения пароводянной смеси после разрыва теплообменной трубы на первоначальном этапе практически не зависит от присоединенного питающего объема и от положения свинцового теплоносителя над зоной истечения. Для равновесного положения свинцового теплоносителя наблюдается большая динамика развития пузыря. При достижении пароводянной полостью стенки корпуса сосуда, развитие пароводянного пузыря вдоль корпуса сосуда в вертикальном направлении первые 15–20 мс не зависит от первоначального положения теплоносителя и присоединенного питающего объема.

Согласно проведенным расчетам, процесс выхода давления на стационарный уровень в рабочей зоне демонстрационного сосуда для заданного в ПМ положения свинцового теплоносителя должен начинаться примерно после 20 мс, далее величина давления зависит от присоединенного питающего объема, чем больше объем, тем больше стационарное давление (для трубы 18x2,5 мм и диаметра рабочей части сосуда 160 мм, присоединенном объеме 16 л давление в расчете составило 7 МПа).

В расчетах было получено изменение давления по длине рабочей зоны стенда, в которой располагаются исследуемые трубы. Вдали от зоны разрыва давление растет медленно, что демонстрируют кривые давлений на поверхности исследуемой трубы (рис. 32). В районе закрепления исследуемых труб давление практически монотонно за 3–5 мс изменяется от нуля, приближаясь к значению стационарного процесса.

Проведенный анализ действующих импульсов давления в рабочей зоне демонстрационного стенда показал, что первые 0,5–1 мс исследуемая труба нагружается пиковым динамическим давлением от открытия дефекта, от 1 мс до 3–5 мс происходит нагружение истекающей пароводяной смесью и струями свинца. Затем исследуемая труба нагружается импульсами давлений, связанными с движением свинца и пароводяного пузыря в корпусе демонстрационного U-образного стенда.

При статическом приложении внутреннего давления 18 МПа в стенке исследуемой трубы возникают напряжения, из которых окружные напряжения (кольцевые) определяют ее прочность. Для трубы с лысками максимальные окружные напряжения в зоне дефекта равны 108 МПа ( $\sigma_T = 268$  МПа), для трубы без лысок – 36 МПа. Рассмотрим, как будут изменяться напряжения при действии динамического давления в ТЖМТ при разрыве трубы (25 МПа).

На рис. 33 показано изменение окружных напряжений во времени в точке А (минимальная толщина стенки) трубы с лысками (см. рис. 31) и точке В трубы без лысок (ориентированная на исследуемой трубе без лысок аналогично точке А). При разрыве концентраторов имеет место действие внешнего давления на стенку исследуемой трубы в результате воздействия динамического давления, которое компенсирует действие внутреннего давления и приводит к изгибу трубы. Поэтому проведем оценку напряженного состояния трубы по эквивалентным напряжениям по Мизесу.

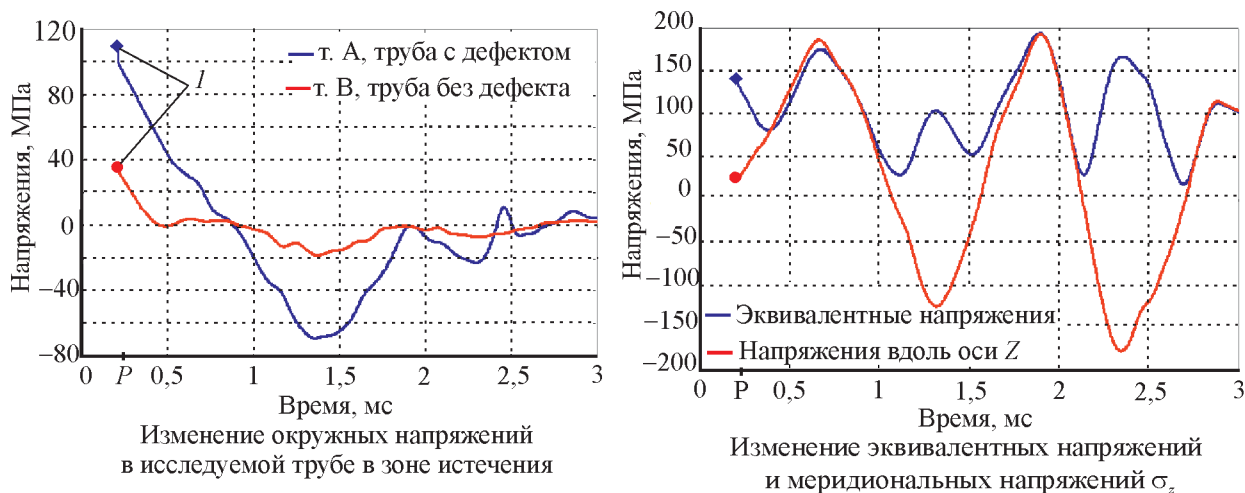


Рис. 33. Изменение напряжений в исследуемой трубе:

$P$  – раскрытие дефекта (0,2 мс);  $I$  – статическое напряжение в трубе в начальный момент времени

Из анализа графиков рис. 33 можно сделать вывод, что, начиная с момента времени 0,5 мс, основной вклад в напряженное состояние трубы вносят меридиональные напряжения  $\sigma_z$  вследствие изгиба. Следовательно, при проведении экспериментов установленные тензорезисторы регистрируют основной компонент – деформации вдоль оси трубы.

Расчетное изменение во времени осевых напряжений (вдоль оси  $Z$ ) и окружных напряжений в выбранных сечениях установки тензорезисторов на исследуемой трубе без лысок показаны на рис. 34.

Полученные в расчете напряжения меньше предела текучести 268 МПа стали ЭП302М-Ш при температуре 500 °С.

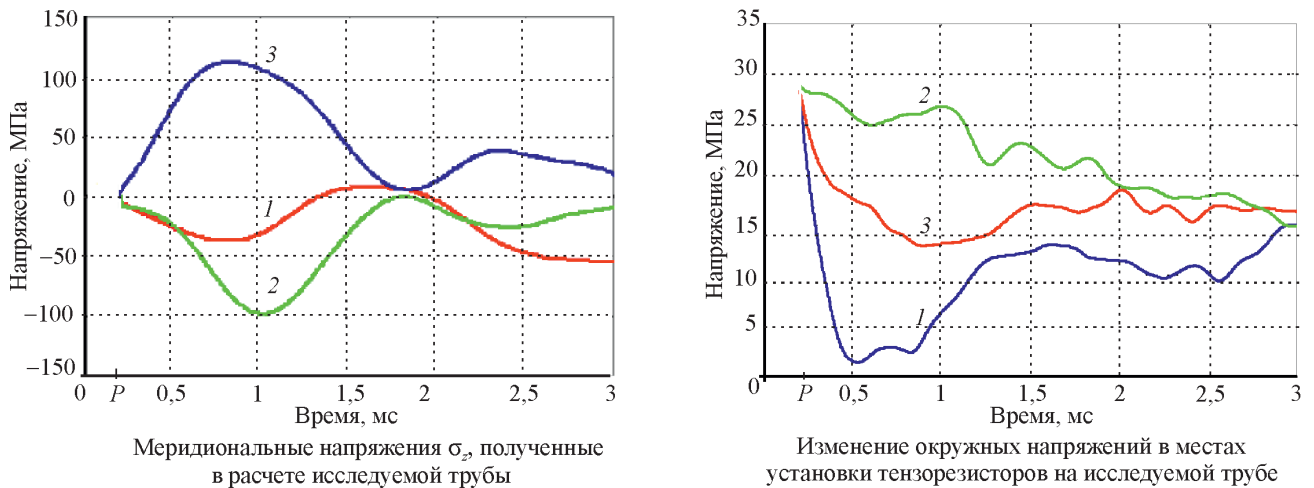


Рис. 34. Изменение напряжений в исследуемой трубе:  
*P* – раскрытие дефекта (0,2 мс); *1* – зона заделки; *2* – четверть высоты трубы; *3* – зона истечения

На рис. 35 представлено напряженно-деформированное состояние элементов исследуемого блока в моменты времени 0,7 мс, 1,4 мс, 1,7–1,9 мс и 2,4 мс, иллюстрирующее динамику процесса изгиба исследуемой трубы в демонстрационном стенде. Упругие перемещения мишени увеличены в 20 раз для отражения ее формы колебаний.

Максимальное деформирование трубы в экспериментах, как и в расчетах, происходит в зоне истечения. Сопоставление между собой расчетных кривых и экспериментально полученных говорит об их аналогичном характере.

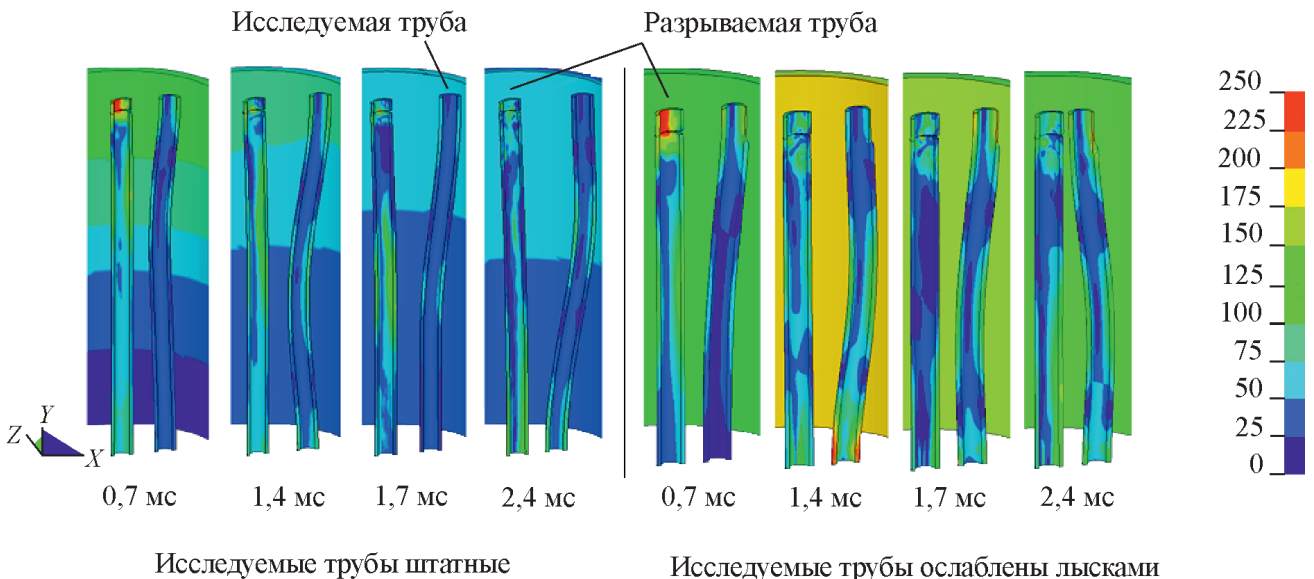


Рис. 35. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (МПа) в элементах исследуемого блока в различные моменты времени

Имеющиеся различия по амплитудам и временной реализации между расчетом и экспериментом объясняются тем, что в расчете моделировалась одна исследуемая труба, а в эксперименте их шесть, установленных на расстоянии ~ 13 мм друг от друга, что приводит к увеличению нагрузки, действующей на мишени. Следует отметить, что численное моделирование нагружения исследуемой одиночной трубы в модельном стенде по амплитудам деформаций дало более близкое совпадение результатов расчета и эксперимента.



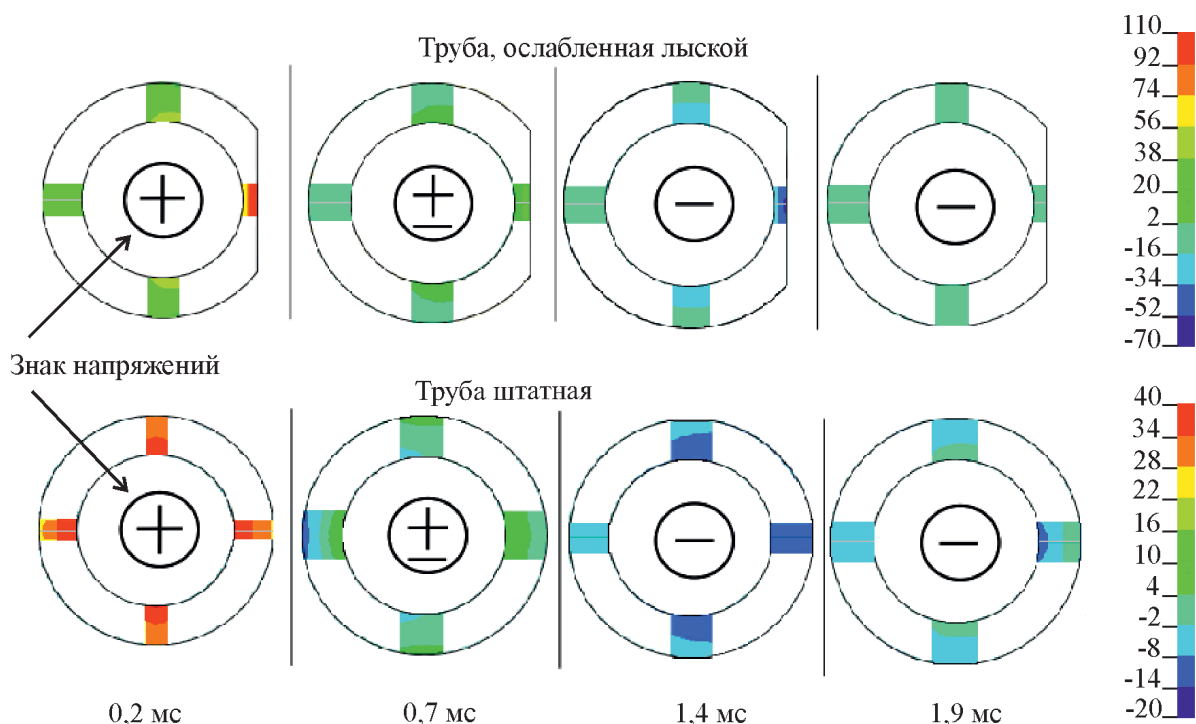


Рис. 36. Распределение окружных (кольцевых) напряжений (МПа) в элементах исследуемого блока в различные моменты времени в зоне истечения

Проведенные расчеты показали, что трубы с ослабленным сечением при разрыве соседней трубы должны деформироваться примерно так же, как и трубы без лысок (см. рис. 35). При этом окружные напряжения, возникающие в ослабленном сечении в зоне минимальной толщины стенки, в несколько раз выше, чем в неослабленном сечении (рис. 36).

### 3.4. Выводы

В консервативной постановке в экспериментах со штатным трубным пучком на демонстрационном стенде показана невозможность перерастания одиночного разрыва во множественный в ПГ РУ типа БРЕСТ. Формируемый разрыв в трубе был в 1,7 раз больше требуемого по ПМ дефекта (не менее удвоенной площади проходного сечения трубы 18×3 мм). В экспериментах расстояние между зонами крепления труб в пучке равнялось 900 мм, что несколько больше, чем в конструкции ПГ.

Для исследуемого пучка труб проведено два нагружения практически с максимальными давлениями разрушения 23,9 и 24,8 МПа нагружающей трубы. Максимальная достигнутая деформация исследуемых труб в экспериментах равна 0,0014 ед., что меньше деформации, соответствующей условному пределу упругости стали ЭП302М-Ш при температуре 500 °С, равному 0,0021 ед.

Двукратным нагружением был испытан штатный трубный пучок, ослабленный в зоне разрыва нагружающей трубы лысками глубиной 2 мм, имитирующими фреттинг-износ или дефект при изготовлении. Давление разрушения нагружающей трубы в экспериментах составило 24,9 и 14,4 МПа.

После проведения всех экспериментов исследуемые блоки труб в нормальных условиях были нагружены внутренним давлением  $P_{\text{пров}} = 30 \pm 1$  МПа. При действии проверочного давления прочность труб сохранилась.

При проведении всех экспериментов материал труб мишеней ЭП302М-Ш испытывал только упругие деформации.

Проведение прямых экспериментов с элементами ПГ при всех возможных разгерметизациях теплообменных труб трудоемко, сложно и требует специального оборудования (высокая

температура, непрозрачность свинца). Численное моделирование происходящих процессов позволяет делать оценку поведения элементов ПГ в ситуациях при разгерметизации трубы. В ходе работы численным моделированием в лагранжево-эйлеровой постановке исследовался процесс истечения пароводяной смеси в теплоноситель с фрагментами трубного пучка при разрыве одной из труб. Было показано, что результаты численного моделирования прочности трубного пучка удовлетворительно согласуются с результатами проведенных экспериментов.

Проведенный анализ действующих импульсов давления в рабочей зоне демонстрационного стенда показал, что первые 5–6 мс после разрыва центральной трубы исследуемые трубы, расположенные по окружности от центральной, нагружаются импульсом давления, который аналогичен импульсу давления в ПГ.

После 5–6 мс от момента разрыва трубы, исследуемые трубы в стенде начинают нагружаться давлением, связанными с движением свинца и пароводяного пузыря в стесненных условиях стенда. В реальной конструкции ПГ данный процесс должен иметь менее динамичный характер.

## Заключение

Условия нагружения исследуемых теплообменных труб ПГ РУ типа БРЕСТ в проведенных экспериментах являлись более жесткими, чем в реальном ПГ, так как:

- расстояние между местами закрепления больше штатного;
- раскрываемый дефект расположен посередине между местами крепления исследуемых труб;
- при разрыве теплообменной трубы площадь дефекта была в 1,7 раза больше удвоенной площади проходного сечения штатной трубы ПГ;
- исследуемый пучок труб 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш нагружался двукратно динамическим давлением от раскрытия дефекта с положительным результатом;
- специально ослабленный пучок труб 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш двукратно испытан давлением от разрыва трубы с положительным результатом;
- мишень 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т была четырехкратно испытана динамическим давлением от раскрытия дефекта с положительным результатом, при этом ее прочность при температуре 500°С в два раза меньше, чем трубы 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш;
- после проведения всех экспериментов исследуемые трубы (мишени) в нормальных условиях были нагружены внутренним давлением 30±1 МПа;
- в ходе проведенных исследований деформация теплообменных труб-мишеней 18×3 мм из стали ЭП302М-Ш и 18×2,5 мм из стали 12Х18Н10Т была упругой.

Совокупность расчетно-экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о невозможности перерастания одиночного разрыва трубы парогенератора РУ типа БРЕСТ во множественный вследствие воздействия факторов, обусловленных распространением импульса давления от разорвавшейся ТТ.

## Литература

1. **Першуков, В. А.** [Предисловие к журналу] / Безопасность ядерных технологий и окружающей среды № 1. 2012: «Замыкание ЯТЦ» // Электронный журнал «Атомная энергия 2.0». – URL: <http://www.atomic-energy.ru/journal/2012-1>.
2. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года (ФЦП ЯРБ-2)», Постановление Правительства РФ № 506-12 от 02.06.2014 и № 1641 от 22.12.2018 2014, URL: <http://www.фцп-ярб2030.рф>.
3. **Адамов, Е. О.** Замыкание ЯТЦ гарантирует качественно новый уровень безопасности. [Текст интервью] / Безопасность ядерных технологий и окружающей среды № 1. 2012: «Замыка-

- ние ЯТЦ» // Электронный журнал «Атомная энергия 2.0». – URL: <http://www/atomic-energy.ru/interviews/2013/01/23/38404>.
4. **Лемехов, В. В.** БРЕСТ: быстрый реактор со свинцовым теплоносителем и пристанционным топливным циклом [Текст] / В. В. Лемехов, В. С. Смирнов / Безопасность ядерных технологий и окружающей среды № 1. 2012: «Замыкание ЯТЦ» // Электронный журнал «Атомная энергия 2.0». – URL: <http://www.atomic-energy.ru/experts/lemekhov-vadim-vladimirovich>.
  5. **Васильев, С. В.** Парогенератор РУ БРЕСТ-ОД-300. / С. В. Васильев, Ю. В. Кузьминов // Научно-практическая конференция «Проектное направление «Прорыв»: результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики», 3-4 апреля 2015, Калужская область.
  6. **Абрамов, А. В.** Исследование процессов в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубы парогенератора БРЕСТ-ОД-300. / А. В. Абрамов, Е. О. Ковалев, П. А. Колесников и др. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, вып. 3. – С. 164–168.
  7. **Абрамов, А. В.** Обоснование безопасности реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 при разгерметизации теплообменных труб. / А. В. Абрамов, А. Н. Зяблицкий, П. А. Колесников и др. // III Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2014), 2014, ОАО НИКИЭТ, Москва, 2014.
  8. **Афремов, Д. А.** Исследование процессов в парогенераторе РУ БРЕСТ-ОД-300 при авариях с разрывом теплообменных труб. / А. В. Абрамов, Д. А. Афремов // Научно-практическая конференция «Проектное направление “Прорыв”: результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики», 3–4 апреля 2015, Калужская область.
  9. **Безносков, А. В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике [Учебное пособие] / А. В. Безносков, Т. А. Бокова. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 536 с.
  10. **Dinh, T. N.** Multiphase Flow Phenomena of Steam Generator Tube Rupture in a Lead-Cooled Reactor System: A Scoping Analysis // Proceedings of ICAPP 2007, Nice, France, May 13–18, 2007. – P. 7497.
  11. **Безносков, А. В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике [Текст] / А. В. Безносков, Ю. Г. Драгунов, В. И. Рачков / Москва: ИздАТ, 2007. 434 с.
  12. **Филин, А. И.** Системы локализации и защиты реактора БРЕСТ-ОД-300 от превышения допустимого давления в газовом объеме. / А. И. Филин, В. Н. Леонов, М. А. Петрушин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности. АЭС. Ядерные технологии для энергетики будущего. – 2004 – Вып. 4 – С. 106–112.
  13. **Колесников, П. А.** Применение импульсной рентгенографии для исследования процессов, происходящих в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубки реакторной установки / П. А. Колесников, О. А. Никитин, Е. О. Ковалев, и др. // Инновации в атомной энергетике (конференция молодых специалистов), АО НИКИЭТ, Москва, 2014.
  14. **Мухаметов, Р. Р.** Расчетно-экспериментальное обоснование безопасности парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 при разгерметизации теплообменных труб. / А. В. Абрамов, Р. Р. Мухаметов, М. Ю. Науменко, и др. // Инновации в атомной энергетике (конференция молодых специалистов), 2017, АО НИКИЭТ, Москва.
  15. **Мальшев, М. А.** Программа для ЭВМ «ImRes», Свидетельство № 2020612089 от 14-02-2020, Никитин О. А., Мальшев М. А.
  16. **Силаев, В. А.** Премия молодым специалистам РФЯЦ – ВНИИТФ им. Г. П. Ломинского в области технологии и экспериментальной отработки / В. А. Силаев, Р. Р. Мухаметов, Г. Е. Тагиров // ФГУП РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 2014.

## Приложение 1

**Физико-механические свойства стали 12Х18Н10Т и ЭП302М-Ш**

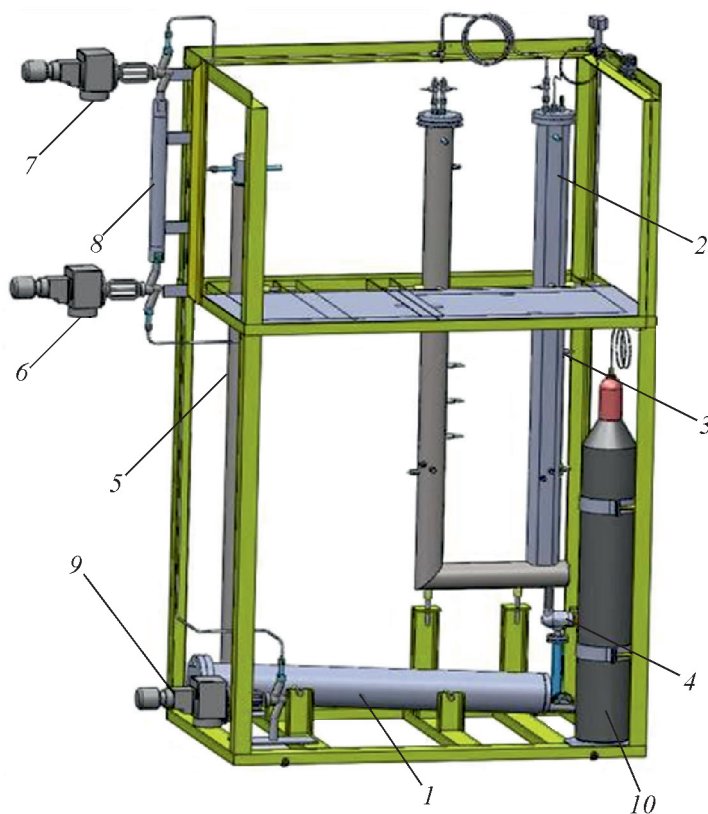
Характеристика свойств материала трубок	Температура	
	20 °С	500 °С
Сталь 12Х18Н10Т		
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	200	150
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	500	350
Модуль упругости $E$ , МПа	$2,05 \cdot 10^5$	$1,66 \cdot 10^5$
Относительное удлинение $\delta$ , %	40	23
Условный предел упругости* $\varepsilon_{0,05}$ , млн <sup>-1</sup>		1400
Сталь ЭП302М-Ш		
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	440	268
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	760	640
Модуль упругости $E$ , МПа	$1,95 \cdot 10^5$	$1,63 \cdot 10^5$
Относительное удлинение $\delta$ , %	47	40
Условный предел упругости* $\varepsilon_{0,05}$ , млн <sup>-1</sup>		2100

$$* - \varepsilon_{0,05} \approx \frac{\sigma_T}{E} + 0,0005$$

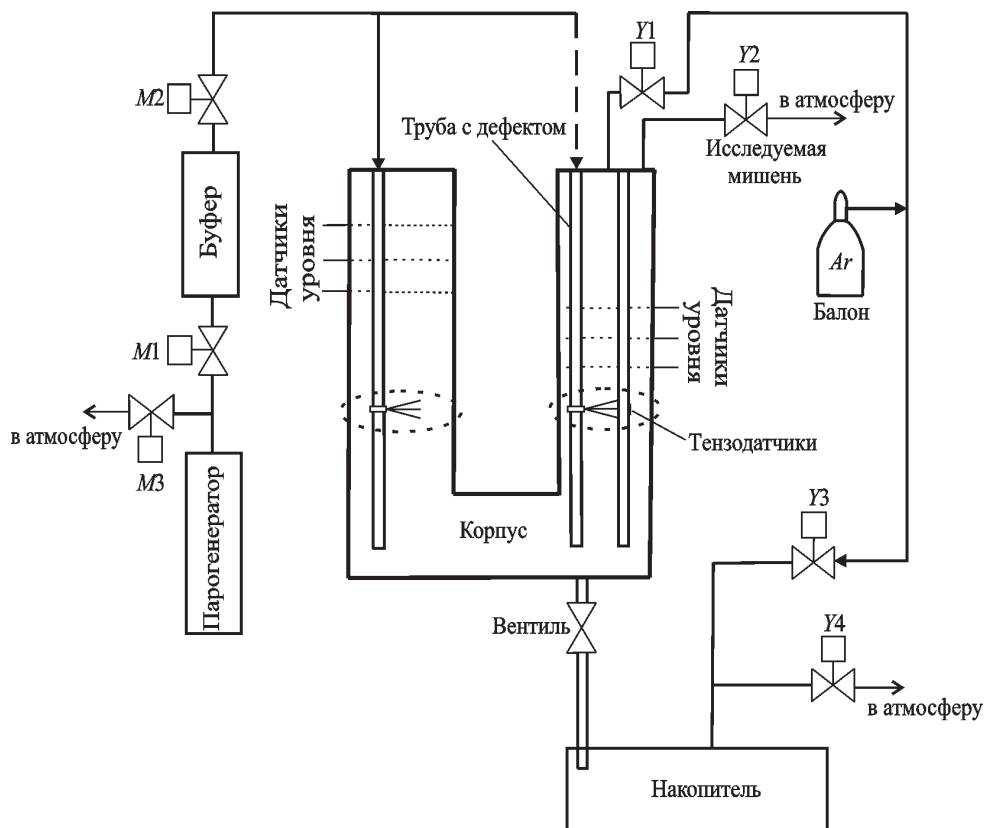


## Приложение 2

## Общий вид и схема модельного стенда Р066-М3

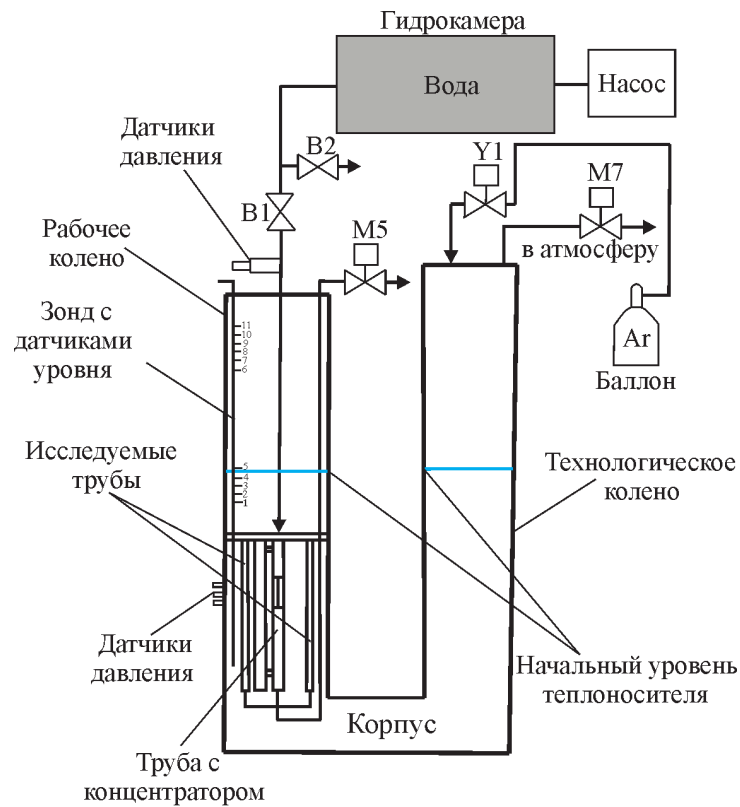
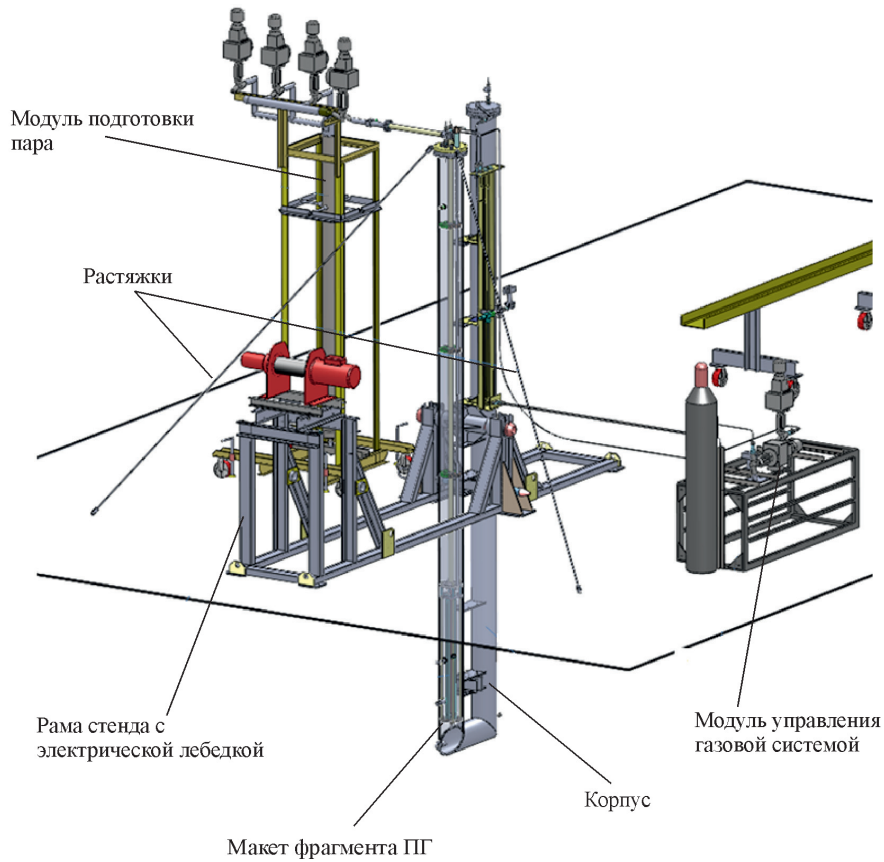


1 – накопитель для слива свинца; 2 – U-образный корпус установки; 3 – датчик уровня свинца; 4 – сливной вентиль; 5 – парогенерирующее устройство; 6, 7 – запорные клапаны для подачи пара; 8 – «буферный» объем; 9 – аварийный клапан; 10 – баллон с аргоном



Приложение 3

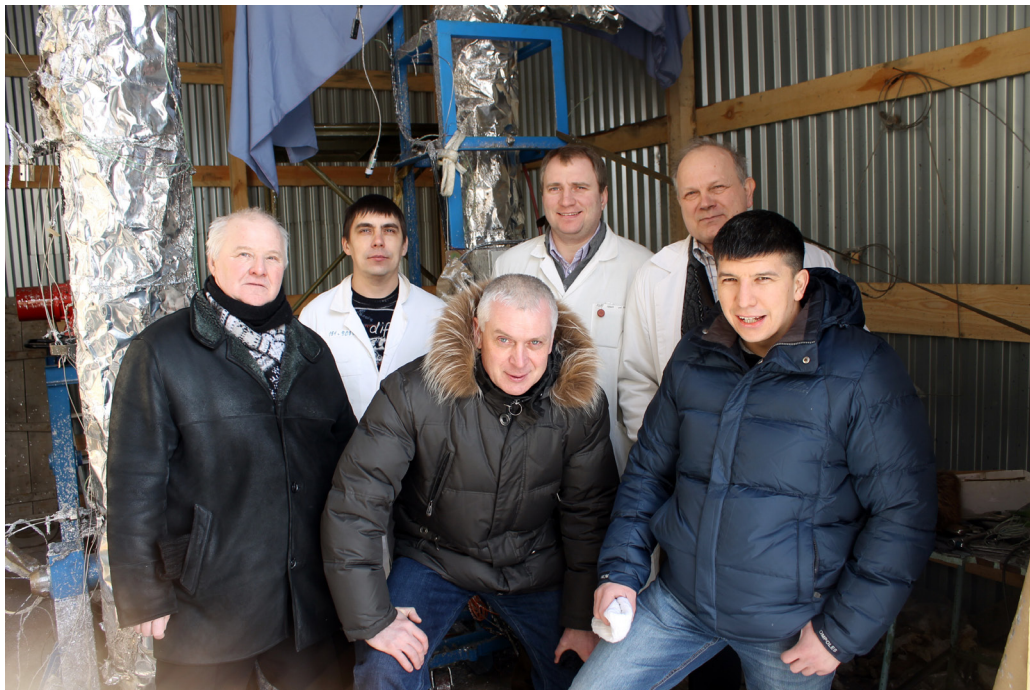
Общий вид и схема демонстрационного стенда R066-M4



## Приложение 4



2014 год Снежинск, итоговое обсуждение выполненных работ (А. В. Тутукин, О. А. Никитин, Д. А. Афремов, М. Ю. Науменко, А. Г. Юдов, А. Н. Зяблицких, А. В. Абрамов, Д. Б. Шадрин)



Завершающие эксперименты со свинцом, демонстрационный стенд (А. В. Абрамов, А. Н. Михалёв, М. Ю. Науменко, В. А. Силаев, С. К. Горбатов, Р. Р. Мухаметов)

Абрамов А. В., Афремов Д. А., Ефанов А. Н., Колесников П. А., Лемехов В. В.,  
Минаев И. В., Науменко М. Ю., Никитин О. А., Силаев В. А., Табатчиков А. А.,  
Таусенев В. В., Тутукин А. В., Уфимцев Ю. С., Хрулев А. Н., Шадрин Д. Б., Юдов А. Г.

## **ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА**

Препринт № 267

Выпускающий редактор

Редактор

Компьютерная верстка

Т. Б. Пряхина

В. Б. Литвинов

О. В. Завьялова

Подписано в печать 29.09.2021. Формат 70×90/16. Гарнитура TimesTenС.

Усл. п. л. 2,95. Тираж 50 экз.

Оригинал-макет подготовлен Издательством РФЯЦ — ВНИИТФ.

Адрес издательства: 456770, г. Снежинск Челябинской обл.,

ул. Васильева, 13,

тел.: (351-46) 5-23-50, 5-22-75,

e-mail: L.S.Talantova@vniitf.ru,

[http: //www.vniitf.ru/](http://www.vniitf.ru/)

Отпечатано в ОНТИ РФЯЦ — ВНИИТФ

