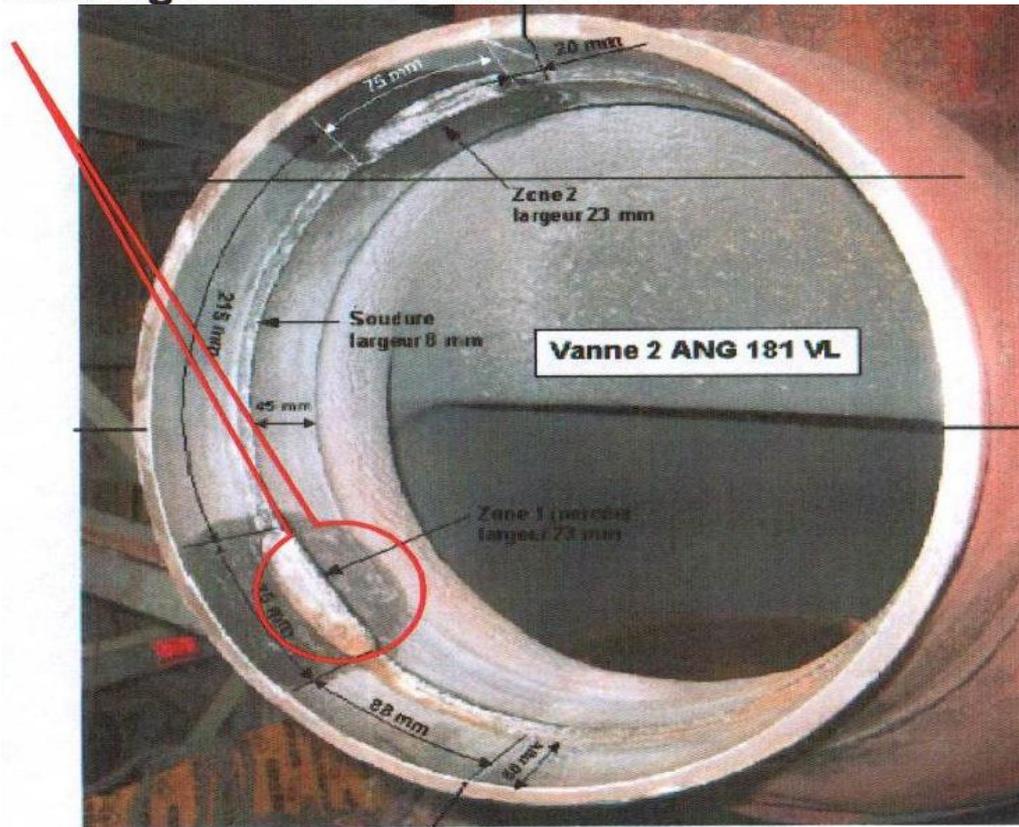


# «Обеспечение эксплуатационной эрозионно-коррозионной стойкости сварных соединений трубопроводов энергоблоков АЭС»

Томаров Г.В., Потапов В.В., Шипков А.А., Овчаров О.В.  
(ВНИИАЭС - ЗАО «Геотерм-ЭМ»)

## Leakage downstream of valve



Vue dans le sens inverse du fluide après découpe



Докладчик:  
Д.т.н., профессор  
Томаров Григорий Валентинович



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Открытое акционерное общество  
«Российский концерн по производству электрической и  
тепловой энергии на атомных станциях»  
(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального  
директора - директор по  
производству и эксплуатации АЭС

А.В. Шутиков

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012

КОМПЛЕКСНАЯ ПРОГРАММА АЭС/РТ- ВЗК(04-03)/2012

мероприятий по предупреждению разрушений и повышению эксплуатационной  
эрозионно-коррозионной стойкости трубопроводов и оборудования АЭС.

№ 24.08.2012

## ***Предпосылки актуализации комплексной программы:***

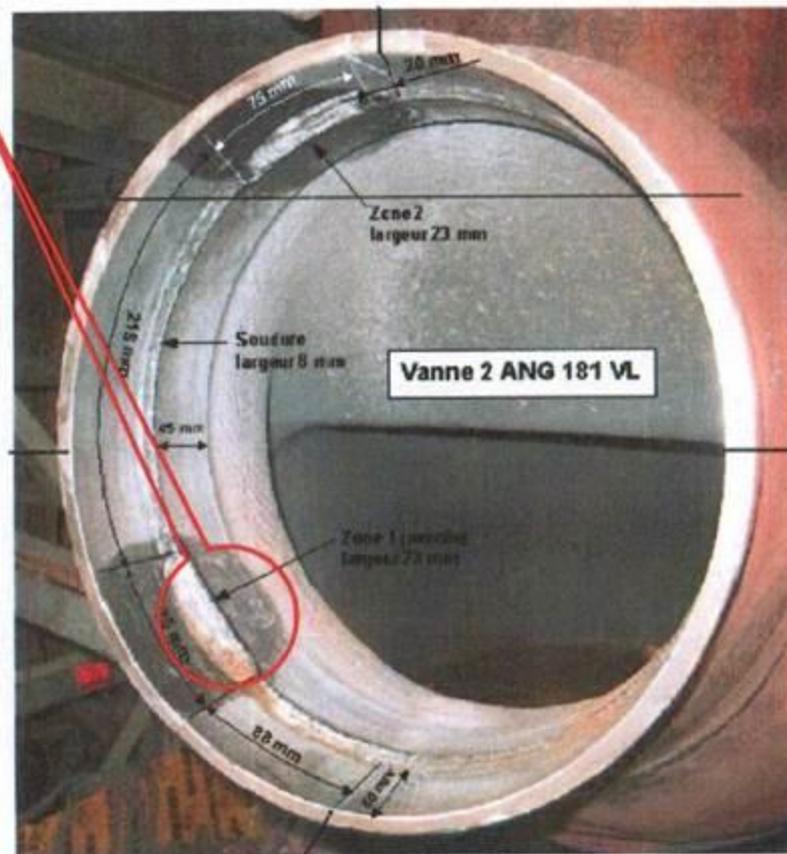
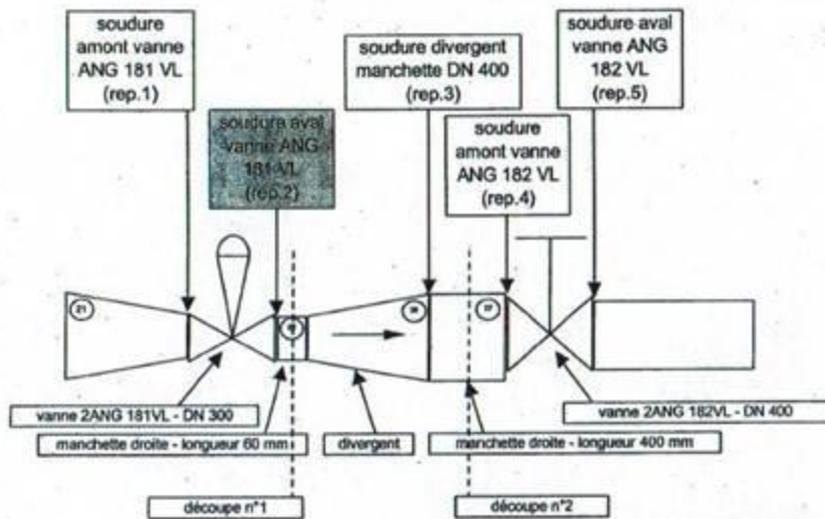
- Выявлены случаи недопустимых утонений и разрушения трубопроводов малых диаметров, сварных соединений элементов основных трубопроводов второго контура, а также элементов узлов регулирования подачи питательной воды блоков АЭС.
- Новые подходы, принципы и средства, разработанные в рамках реализации комплексной программы сделали возможным решение актуальных практических задач по проблемам общей и локальной эрозии-коррозии металла АЭС.
- В результате признания МАГАТЭ достижений России в области эрозии-коррозии металла АЭС (участие российских специалистов в рабочей группе МАГАТЭ по проблеме эрозии-коррозии с 2010 года) расширились возможности использования зарубежных разработок для решения задач актуализированной программы.

## ***Основные задачи Актуализированной Программы:***

- Обеспечить научно-техническое обоснование и разработать практические предложения по оптимизации контрольно-диагностических мероприятий (выявление доминирующих механизмов локальных утонений, определение мест, объемов и периодичности эксплуатационного контроля) для сварных соединений трубопроводов второго контура, элементов трубопроводов малых диаметров и узлов регулирования подачи питательной воды блоков АЭС.

# Пример ЭК утонения в зоне сварного соединения (EDF, Франция)

## Leakage downstream of valve

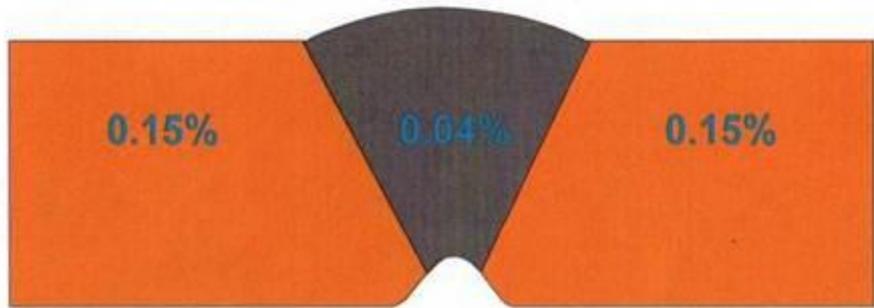


Vue dans le sens inverse du fluide après découpe



Accelerated Corrosion

# WELD & CARBON STEEL AFFECTED BY FAC – effect of chromium content.



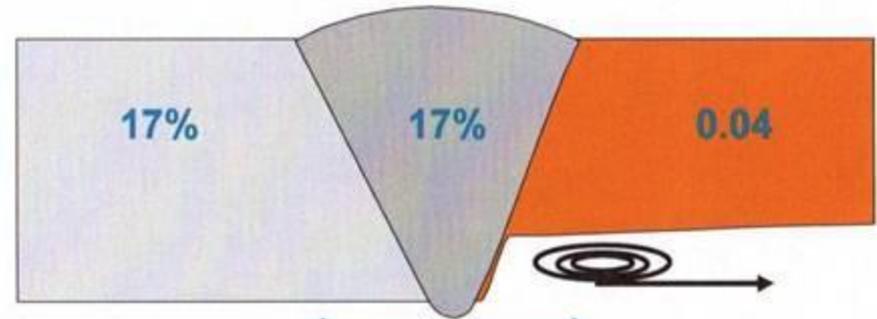
Degradation on weld root



Degradation on weld root and downstream component – disturbance near the weld

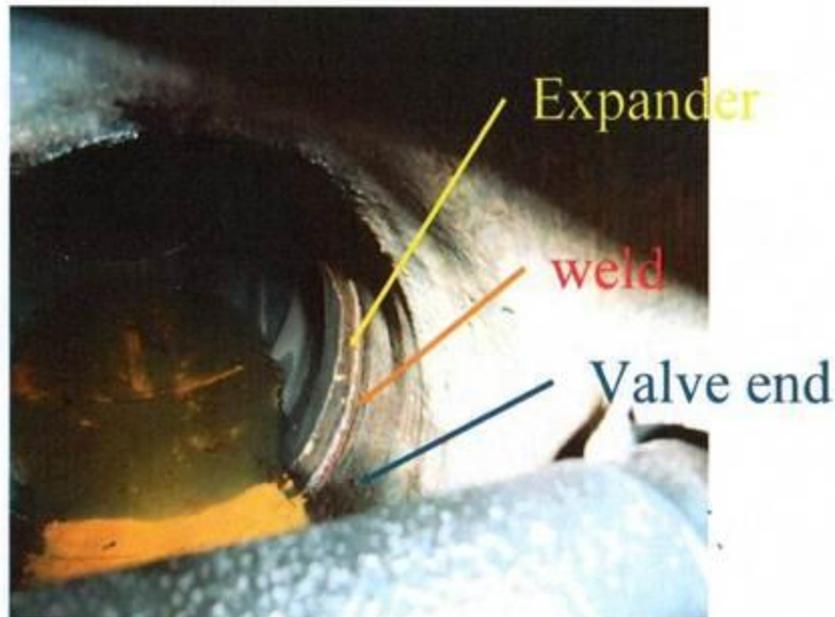


No degradation on weld root  
disturbance near the weld (penetration)

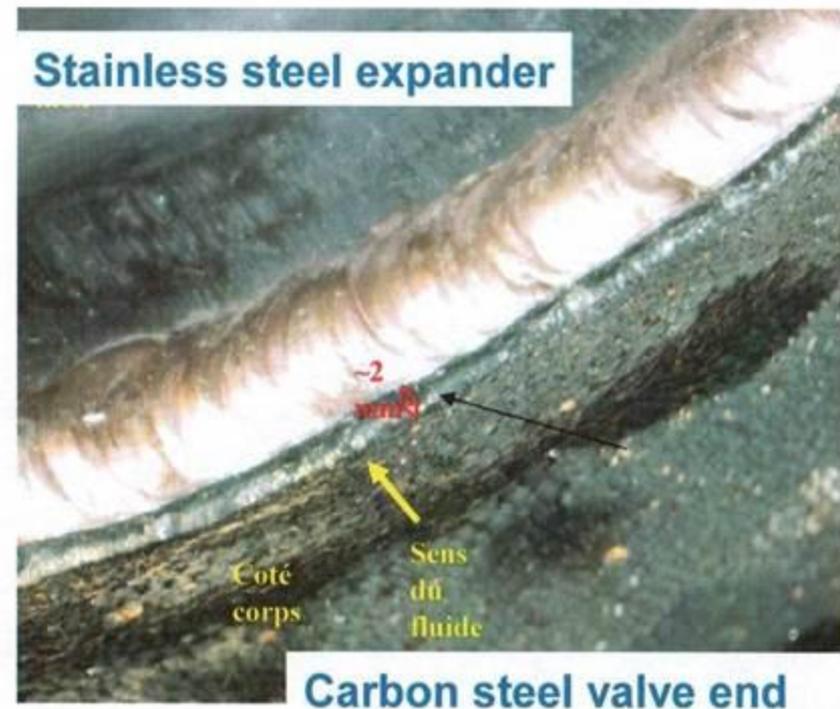


Dissimilar welds  
disturbance near the weld (penetration)  
Entrance-like effect

## Пример локального эрозионно-коррозионного утонения в околошовной зоне участка трубопровода за клапаном (EDF, Франция)

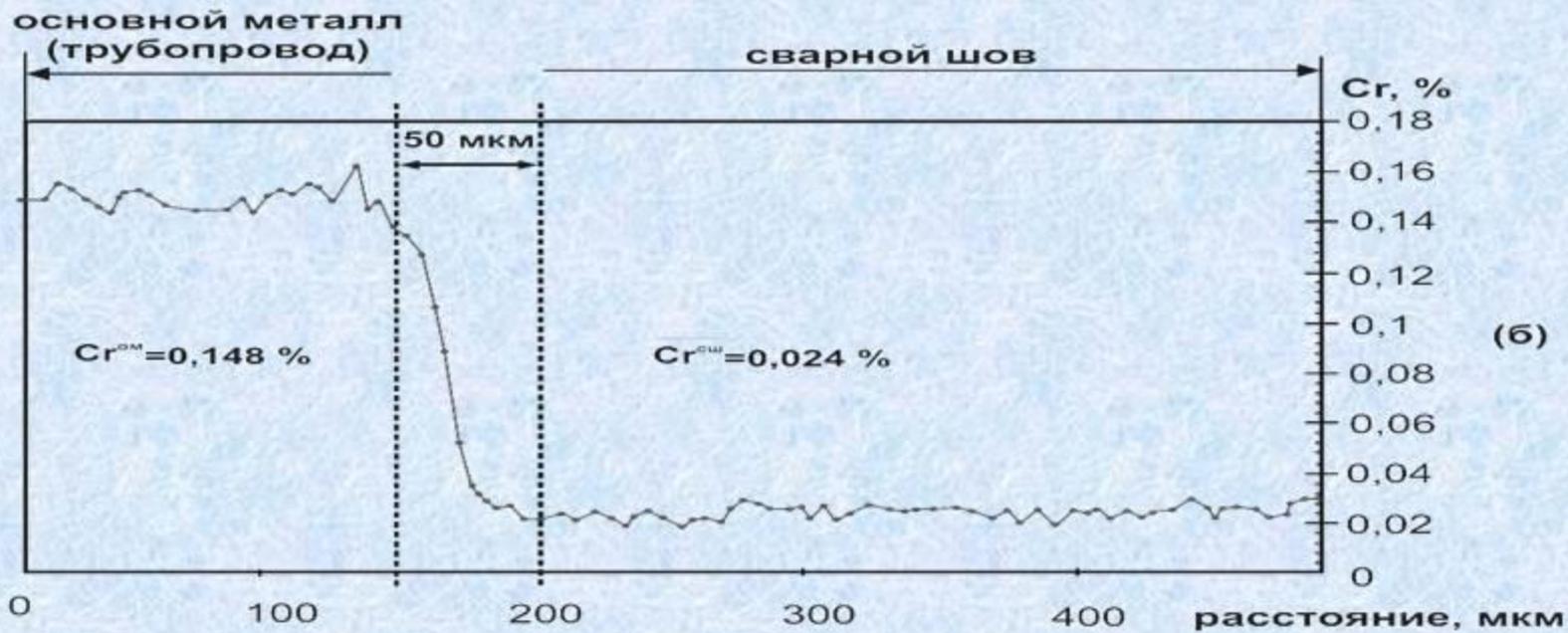
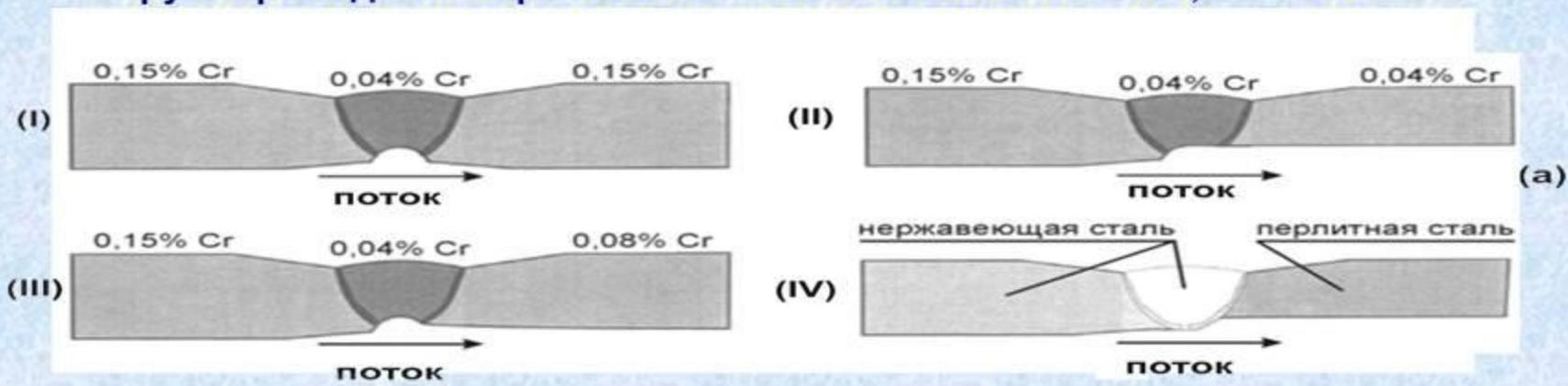


Valve downstream

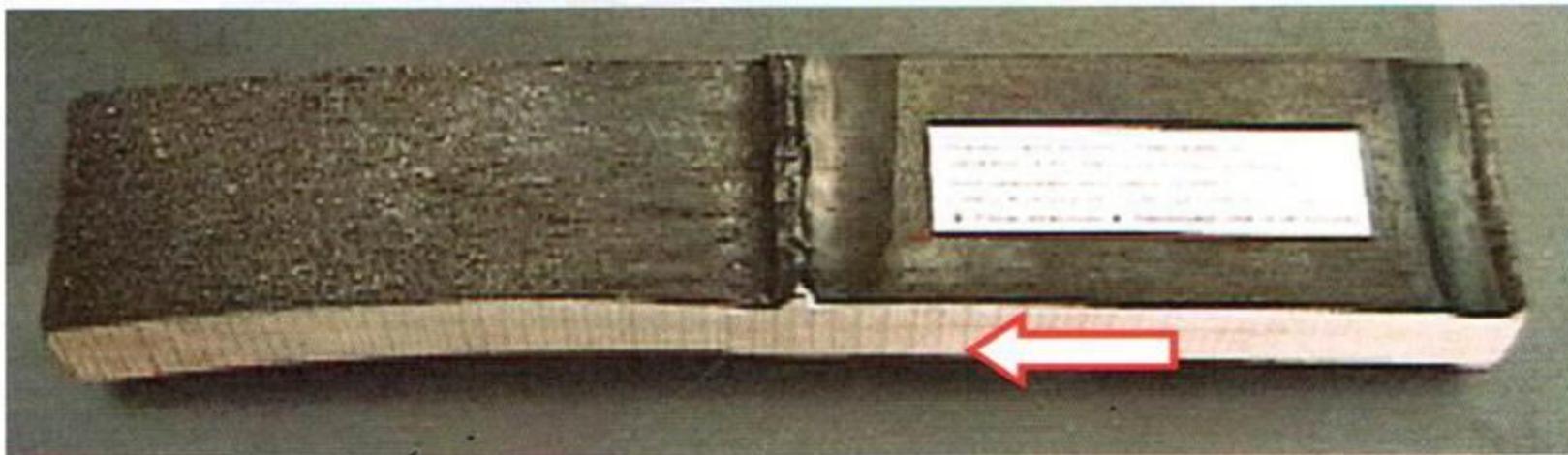


Carbon steel valve  
on a stainless steel line

Примеры вида профиля поверхности околошовной зоны подверженной эрозии-коррозии (I, II, III, IV) в зависимости от содержания хрома в шве и основном металле (а), а также результаты исследований компанией «EDF» (Франция) содержания хрома Cr в зоне контакта основного металла элемента трубопровода и сварного шва на блоке АЭС с РУ PWR; —○— Cr



# Эрозионно-коррозионное утонение в зоне сварного соединения трубопровода КПТ (Ø406,4 мм; S=21,4 мм) энергоблока Diablo Canyon (Калифорния): данные EPRI (США)



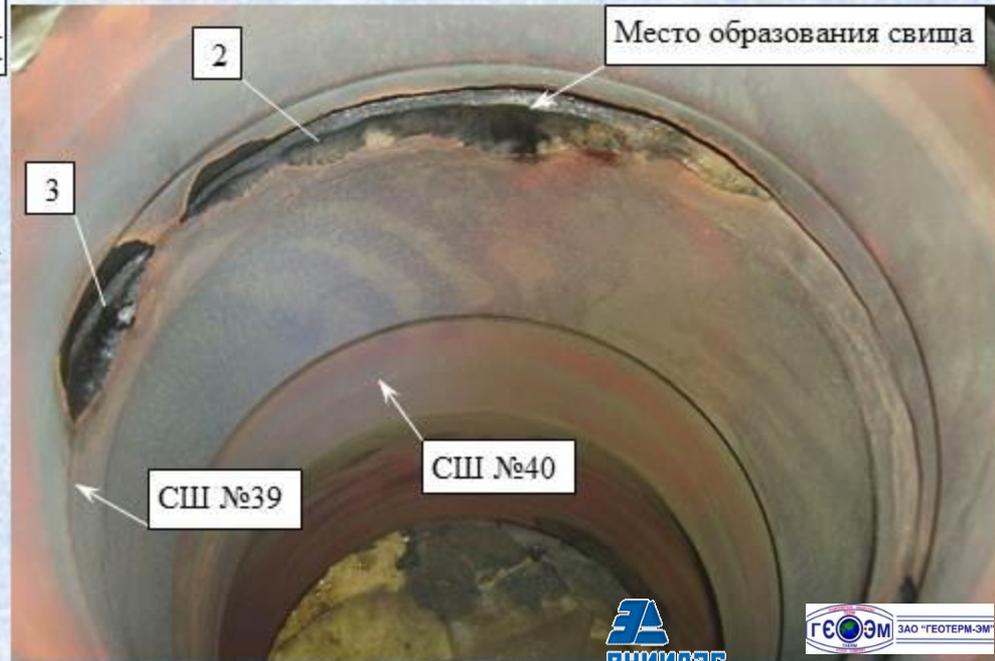
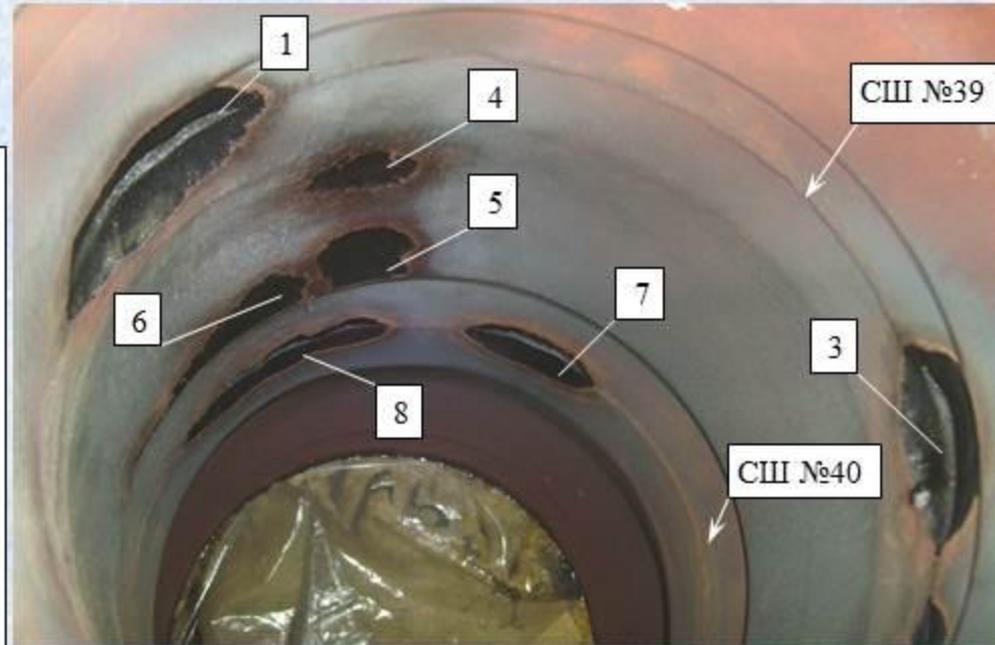
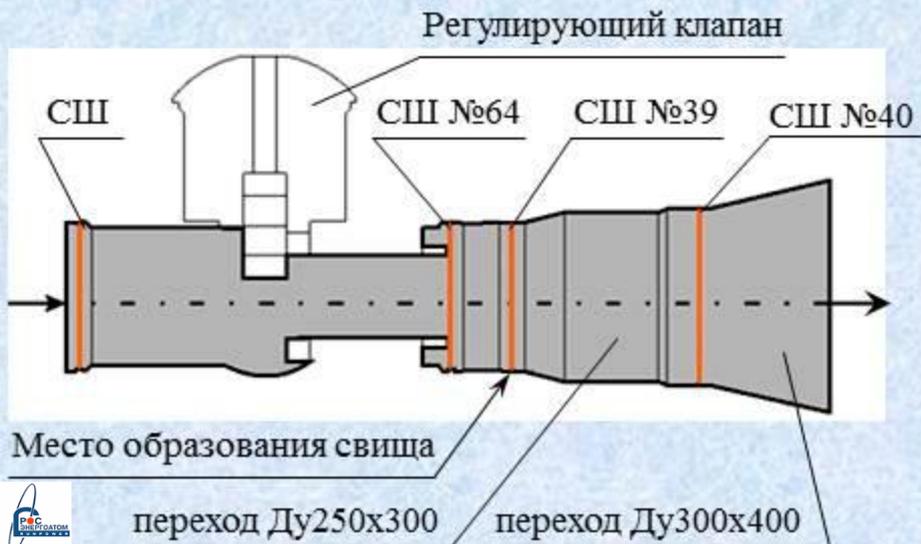
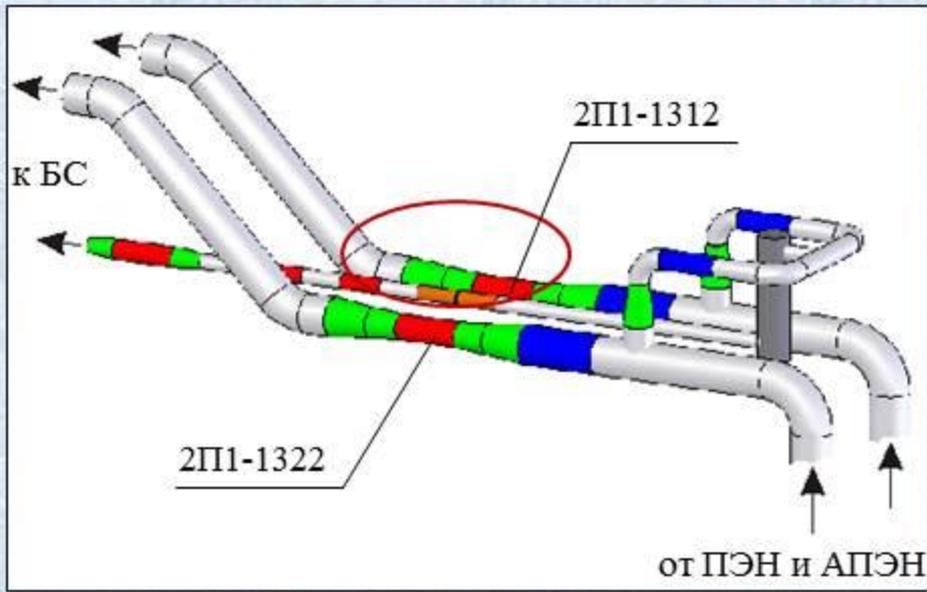
**Figure 1 - Overall View of Entrance Effect at Diablo Canyon**  
(Photograph courtesy of Pacific Gas & Electric)



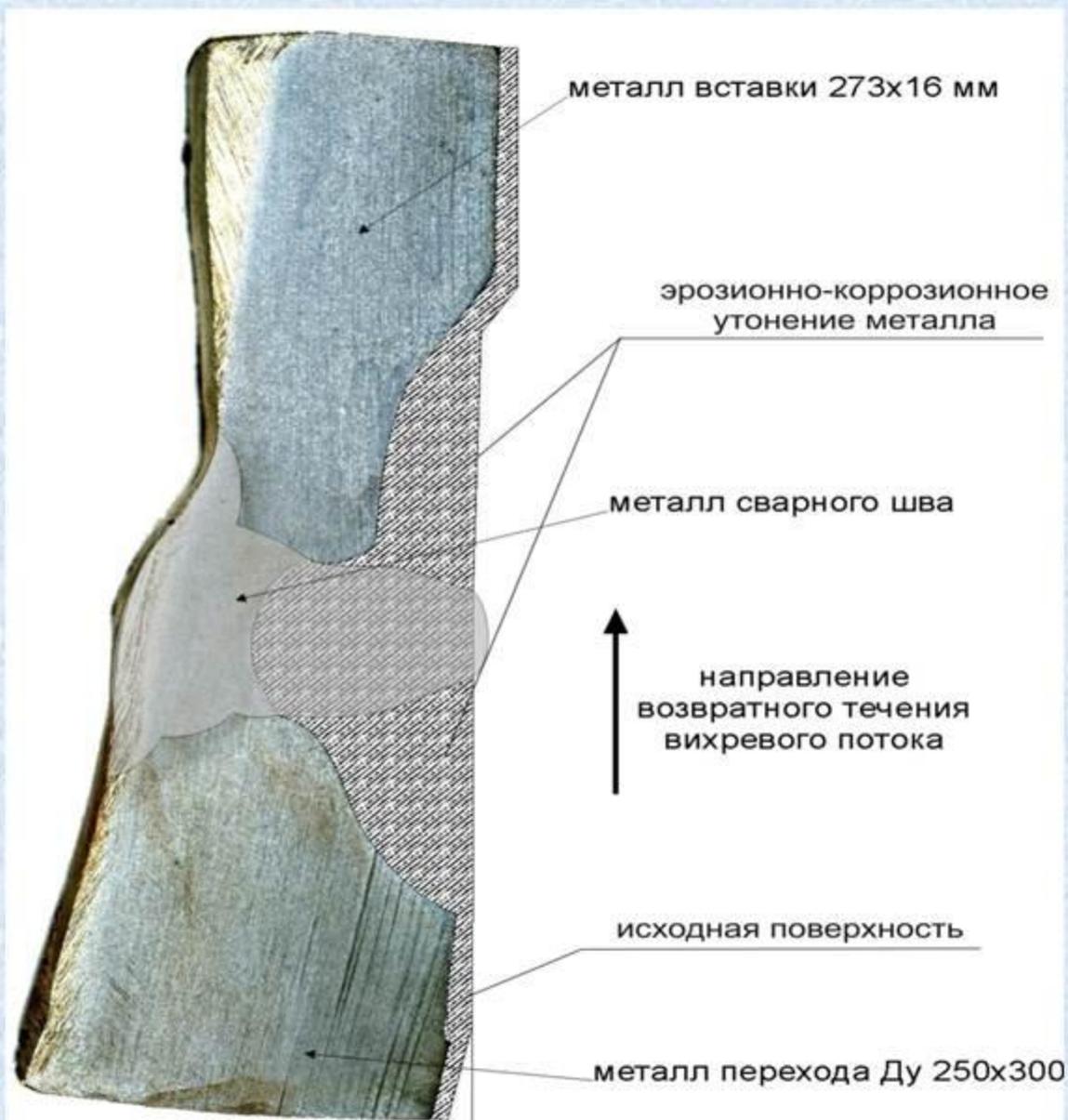
**Figure 2 - Close-up of the Weld Shown in Figure 1**  
(Photograph courtesy of Pacific Gas & Electric)

# Диффузорный участок трубопровода узла регулирования подачи питательной воды блока АЭС

Параметры среды:  $t = 168\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 8,4\text{ МПа}$ ;  
 $G = 1400\text{ т/ч}$



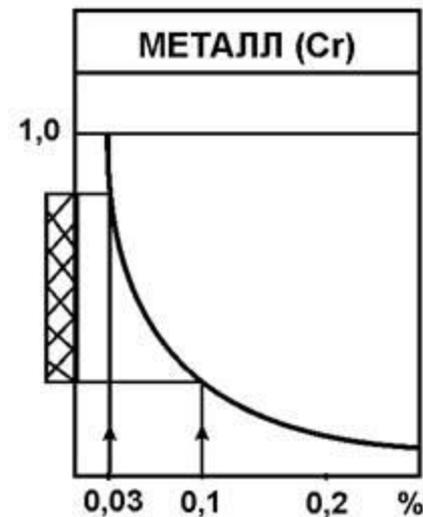
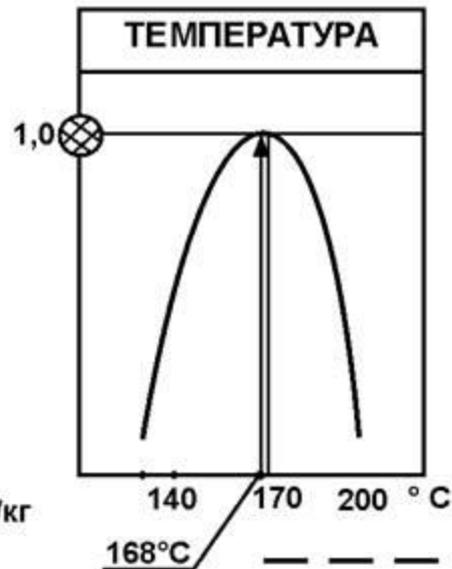
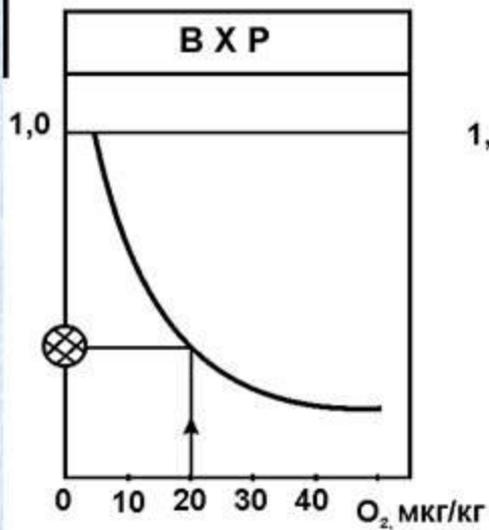
# Геометрия исходной и после ЭК утонения поверхностей сварного соединения (№39) диффузорного участка регулирования подачи питательной воды энергоблока



Основные факторы и их влияние на относительную интенсивность общей и локальной эрозии-коррозии сварных соединений диффузорных участков узлов регулирования подачи питательной воды блока АЭС:

 - зоны относительной интенсивности эрозии-коррозии для параметров соответствующих условиям эксплуатации

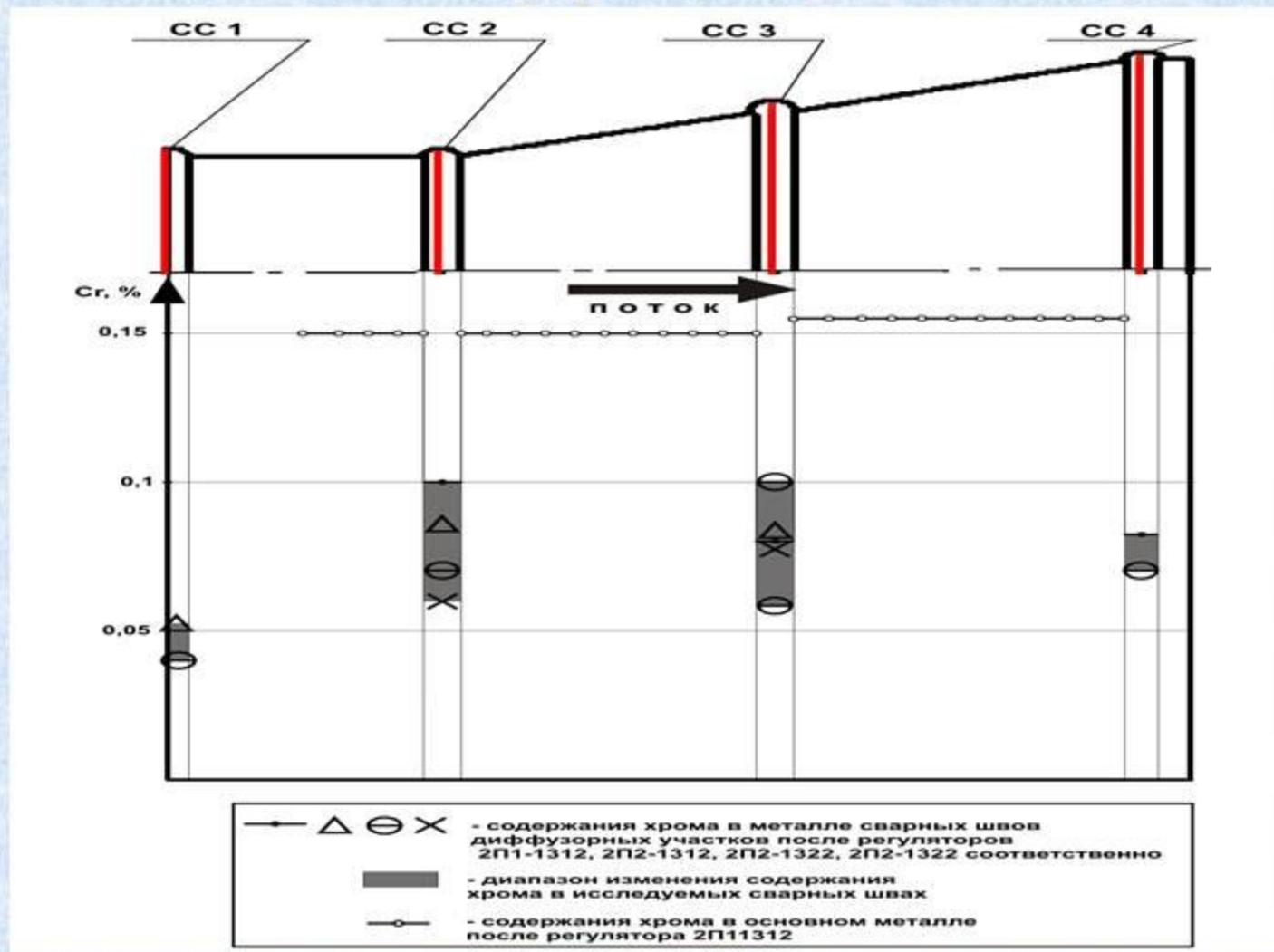
общая эрозия-коррозия



локальная эрозия-коррозия

# Пример содержания хрома в основном металле и сварных швах трубопровода за регулирующими клапанами узлов подачи питательной воды блока АЭС

→, ⊖, Δ, X, - содержания хрома в металле сварных швов диффузорных участков после четырех блочных регуляторов, ■ - диапазон изменения содержания хрома в исследуемых сварных швах, ○ - содержание хрома в основном металле элементов диффузорного участка после регулятора 2П1-1312



Относительная интенсивность эрозии-коррозии основного металла и сварных швов с учетом различия в содержании Cr, Mo, Cu (при прочих равных условиях): \* $t=168\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{\text{внутр}}=400\text{ мм}$ ;  $\text{O}_2=20\text{ мкг/кг}$ ;  $G=1400\text{ т/ч}$

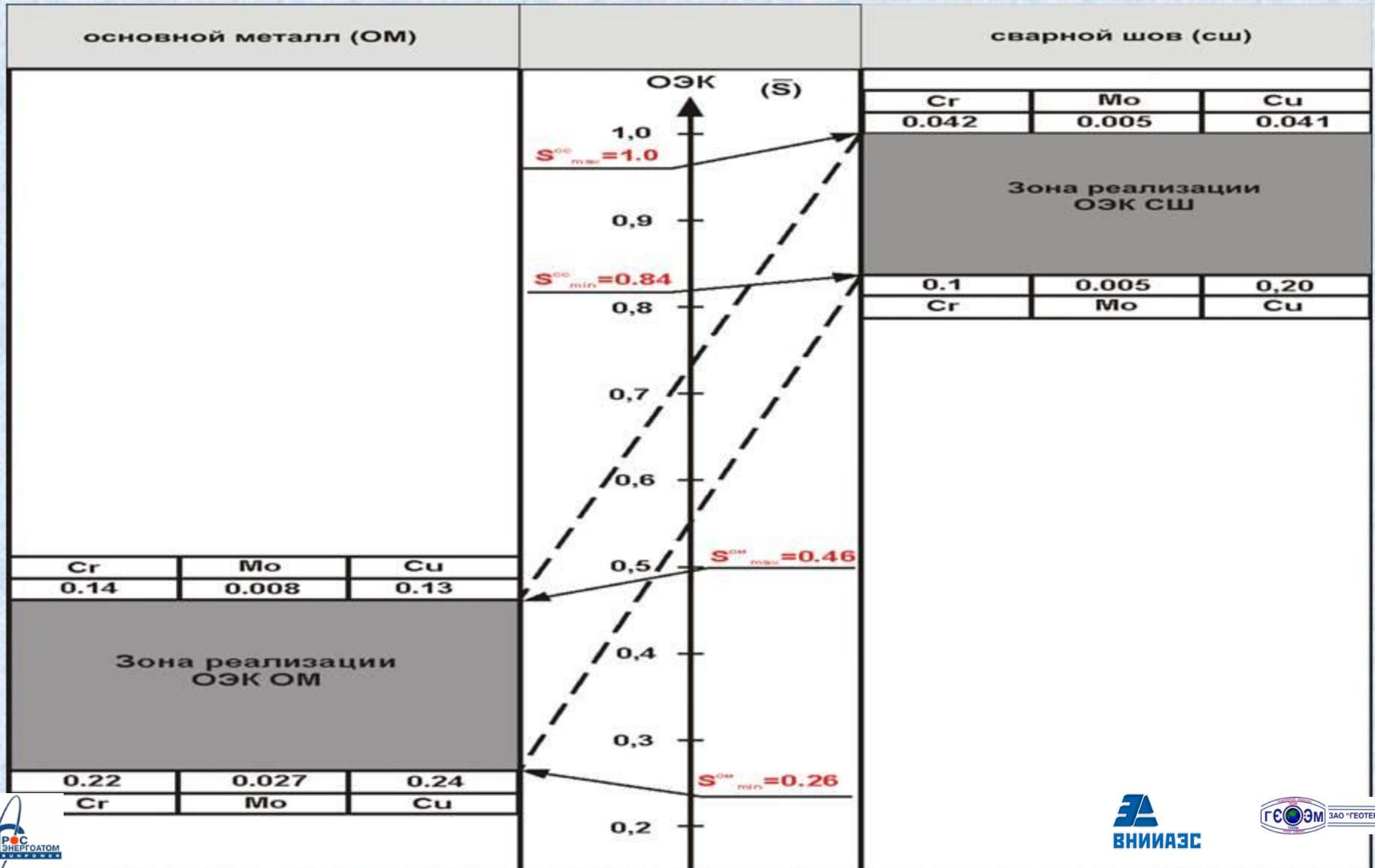
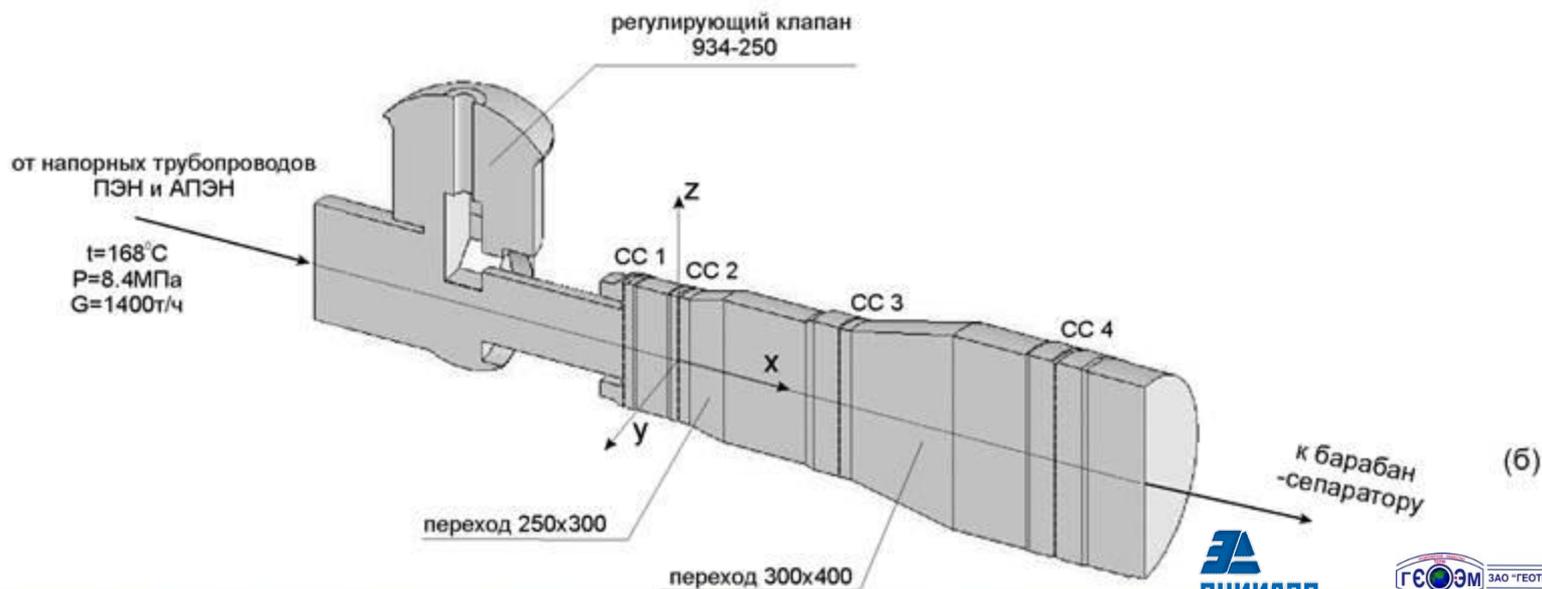
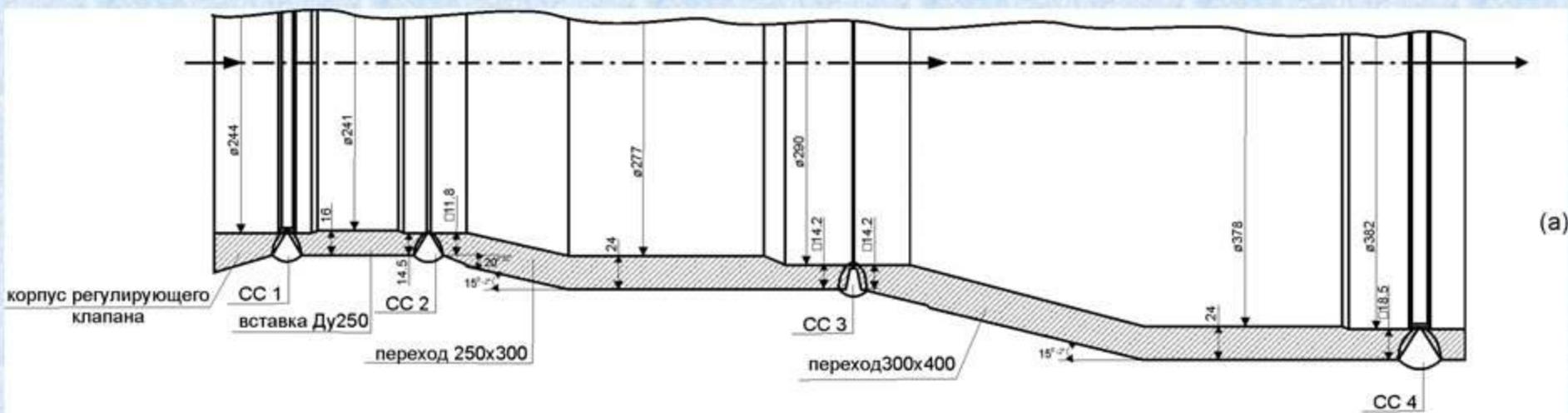
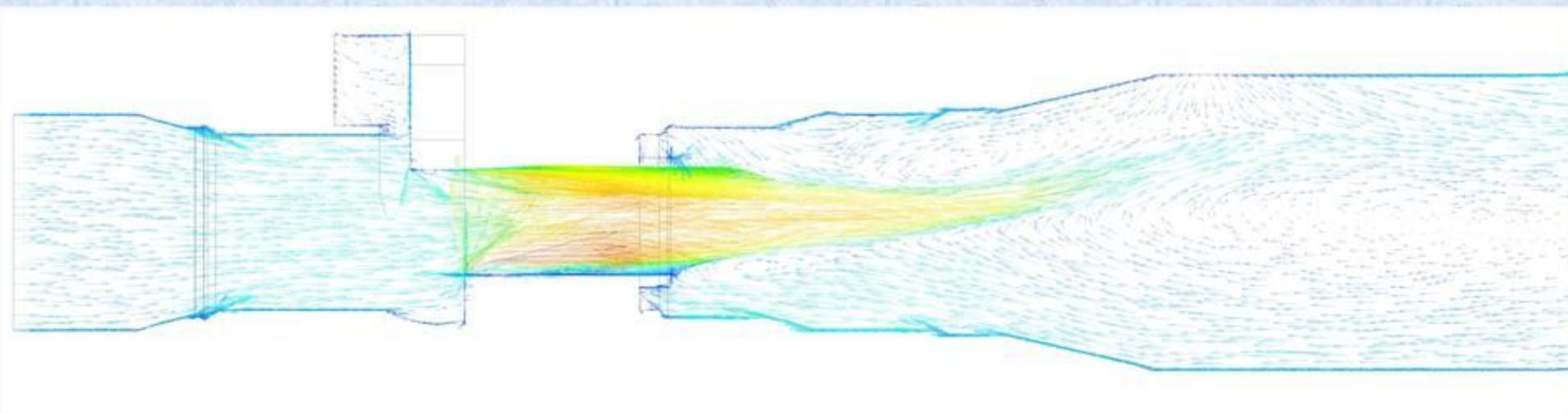


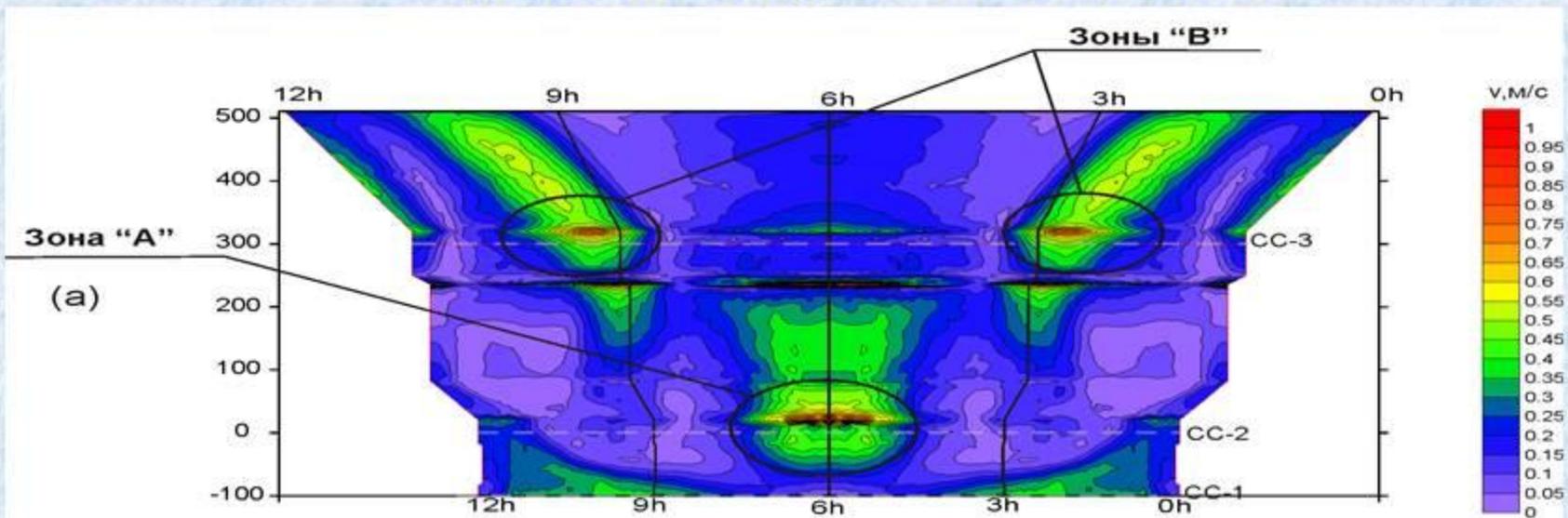
Схема расположения и особенности конструктивного выполнения сварных швов диффузорного участка трубопровода питательной воды после клапанов 2П2-1312 и 2П2-1322 (а) и продольный разрез проточной части узла регулирования подачи питательной воды к барабан-сепаратору блока АЭС (клапан 2П1-1312) (б)



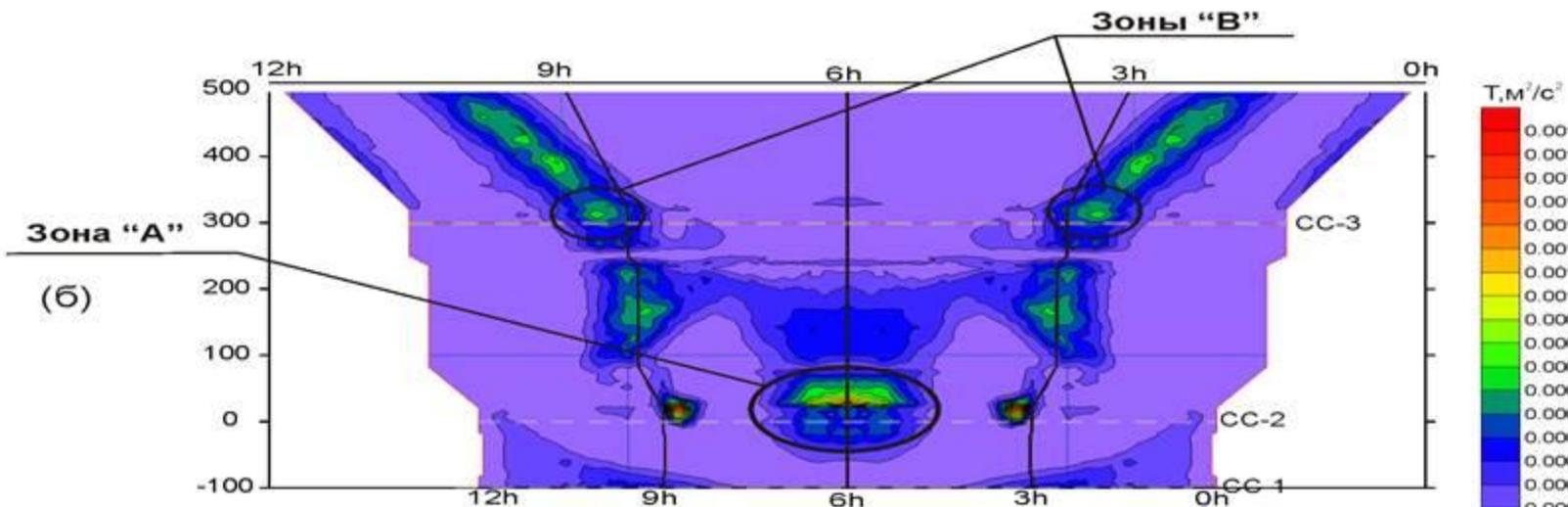
# Результаты гидродинамического моделирования векторного поля скоростей водного потока плоскости симметрии при степени открытия регулирующего клапана 100%



# Развертка скалярного поля скоростей (а) и кинетической энергии турбулентных пульсаций (б) в пристенной области при степени открытия клапана 100 %

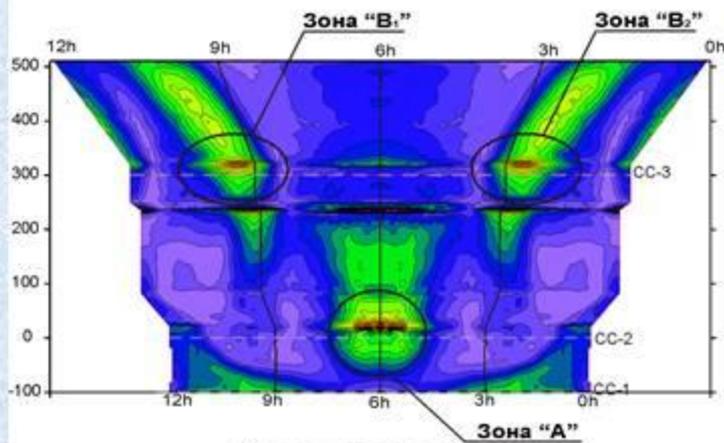


Скалярное поле скоростей

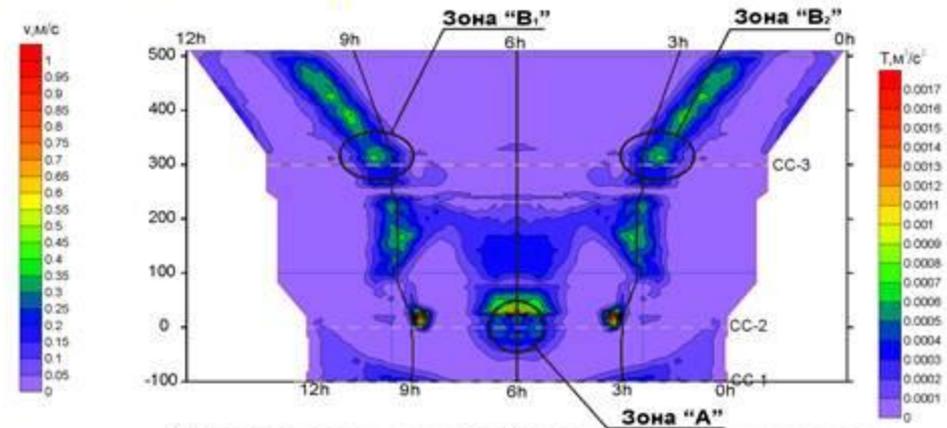


поле кинетической энергии турбулентных пульсаций

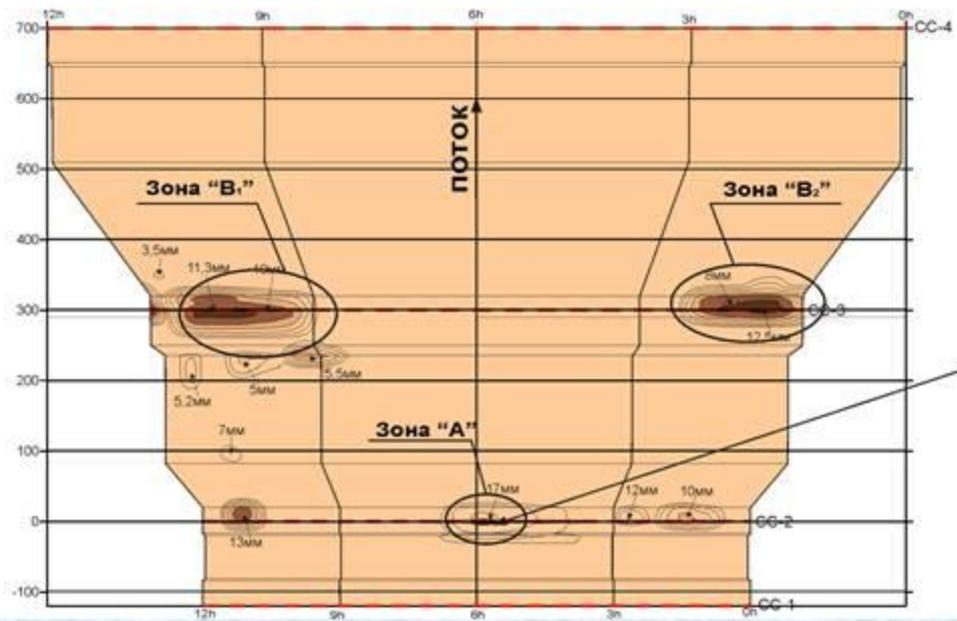
# Сопоставление расположения зон наибольших значений скорости (а) и энергии турбулентных пульсаций (б) в пристенной области с участками максимального эрозионно-коррозионного утонения трубопровода после клапанов при 100 % $\underline{M}$ открытии



Скалярное поле скоростей



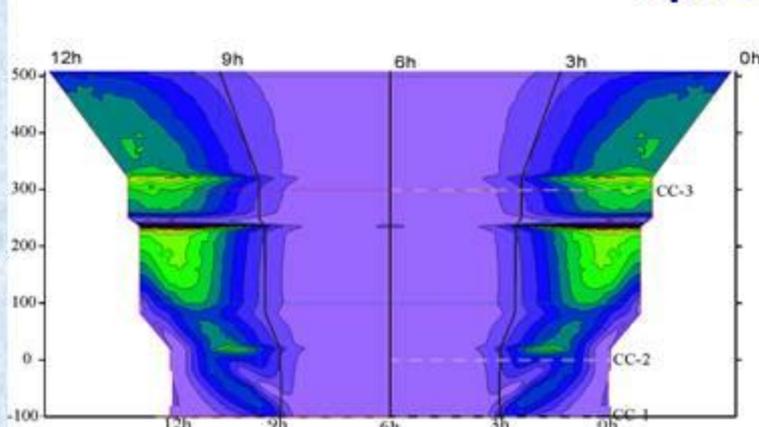
Скалярное поле кинетической энергии турбулентных пульсаций



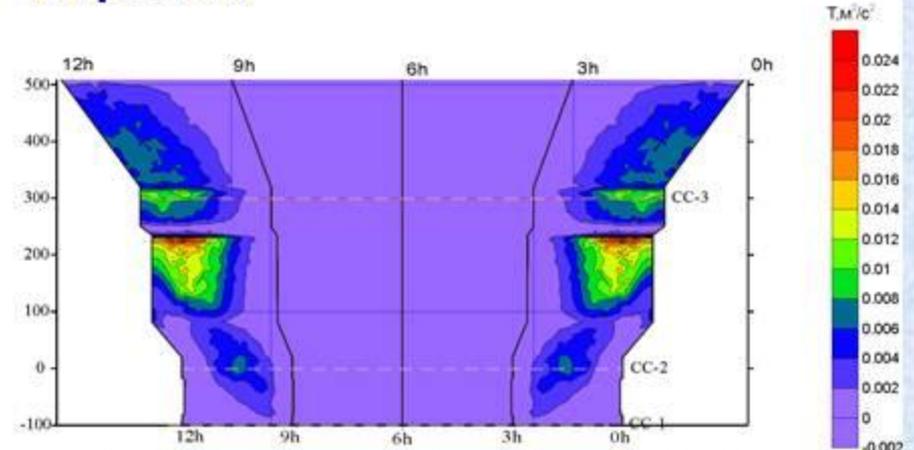
Место образования свища

# Сопоставление расположения зон наибольших значений скорости (а) и энергии турбулентных пульсаций (б) в пристенной области с участками максимального эрозионно-коррозионного утонения трубопровода после клапанов при 40 % М открытия

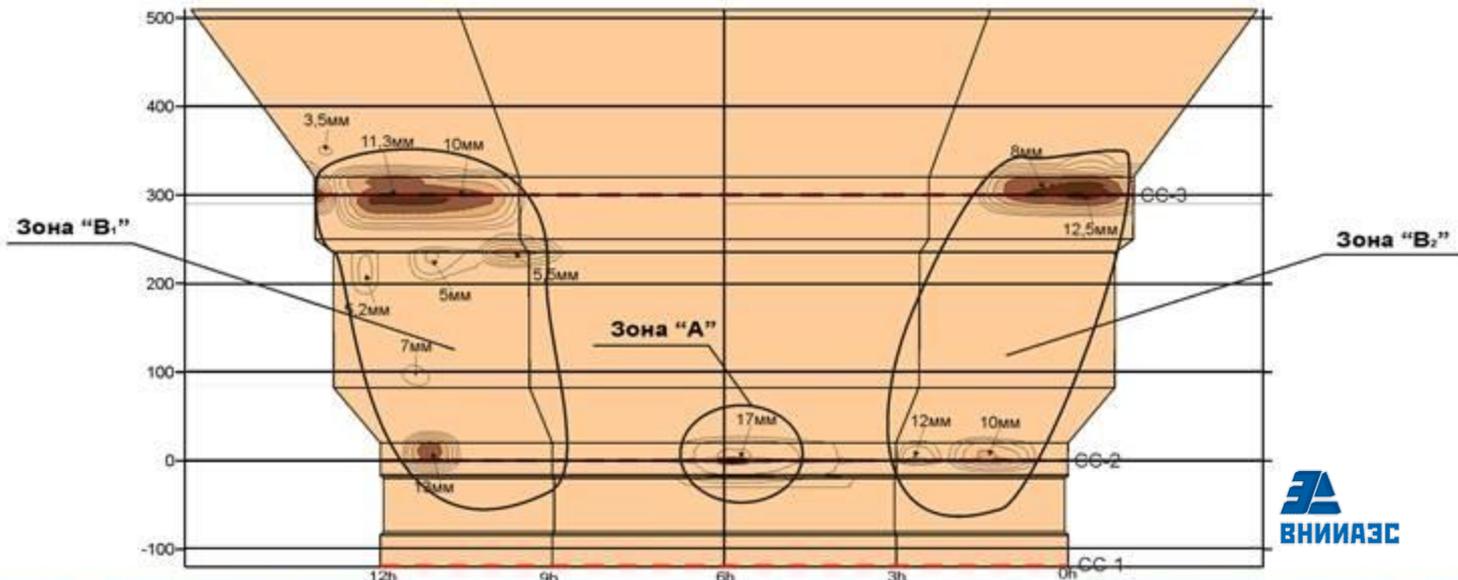
при 40 % М открытия



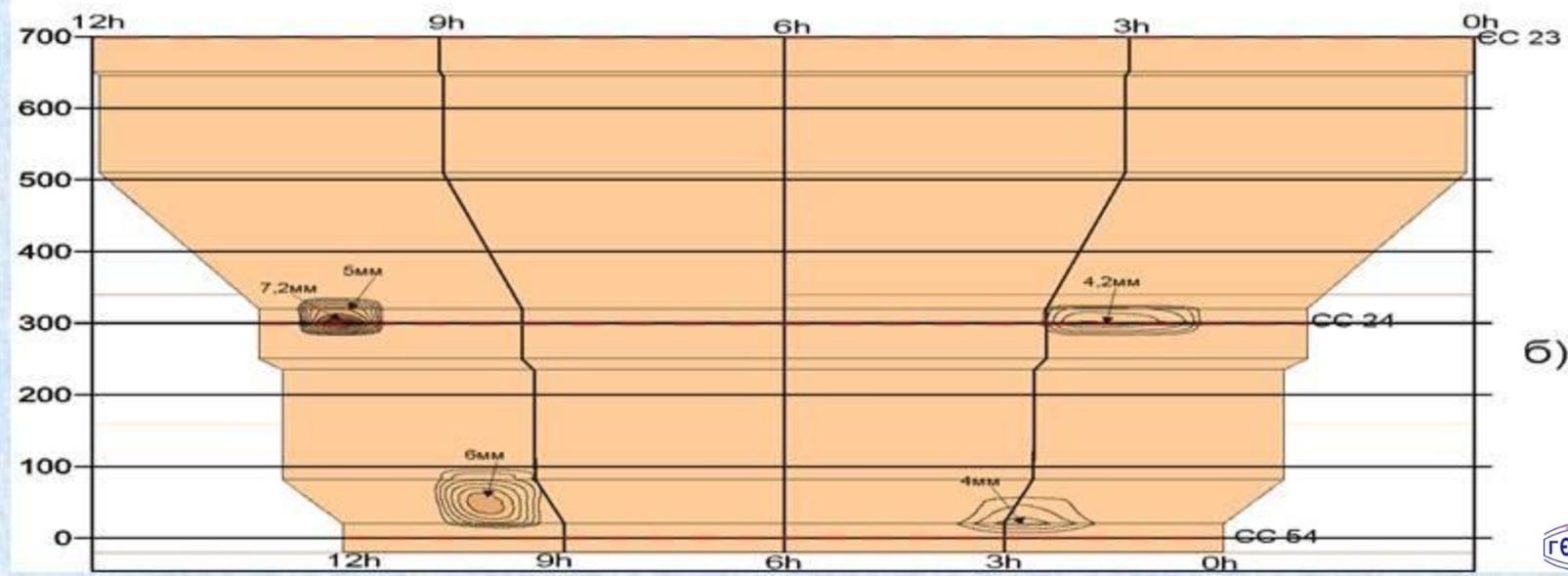
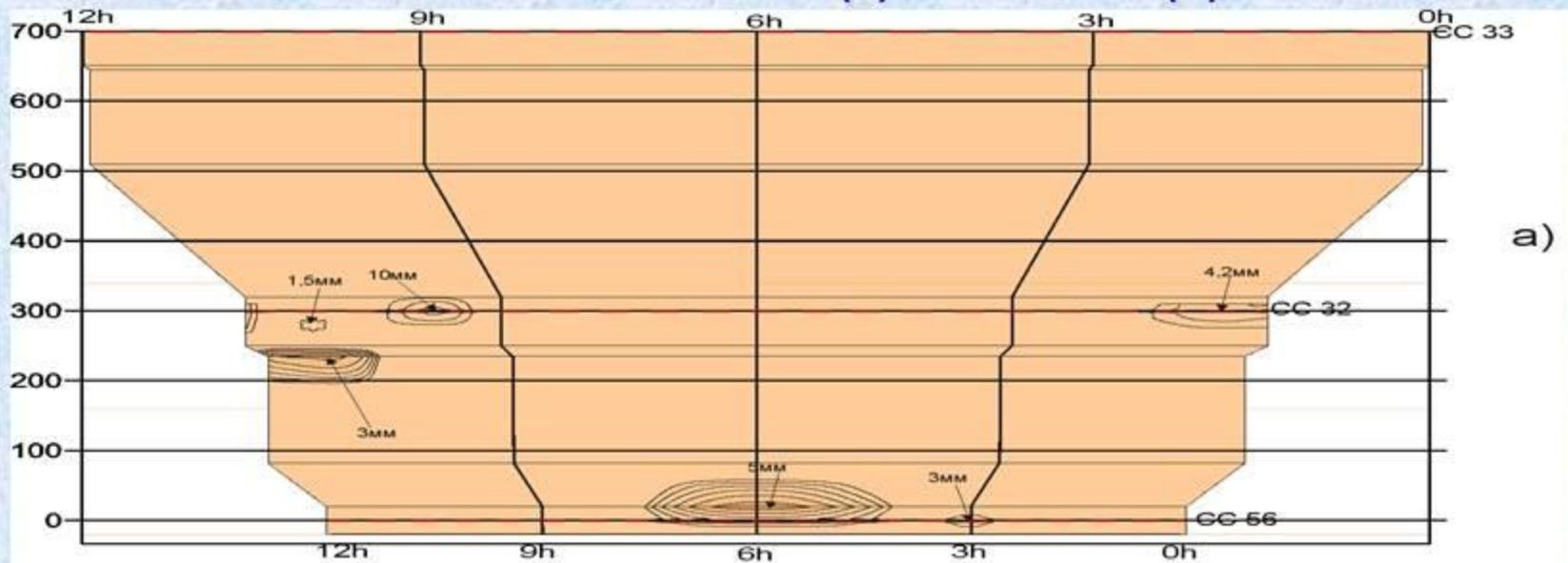
Скалярное поле скоростей



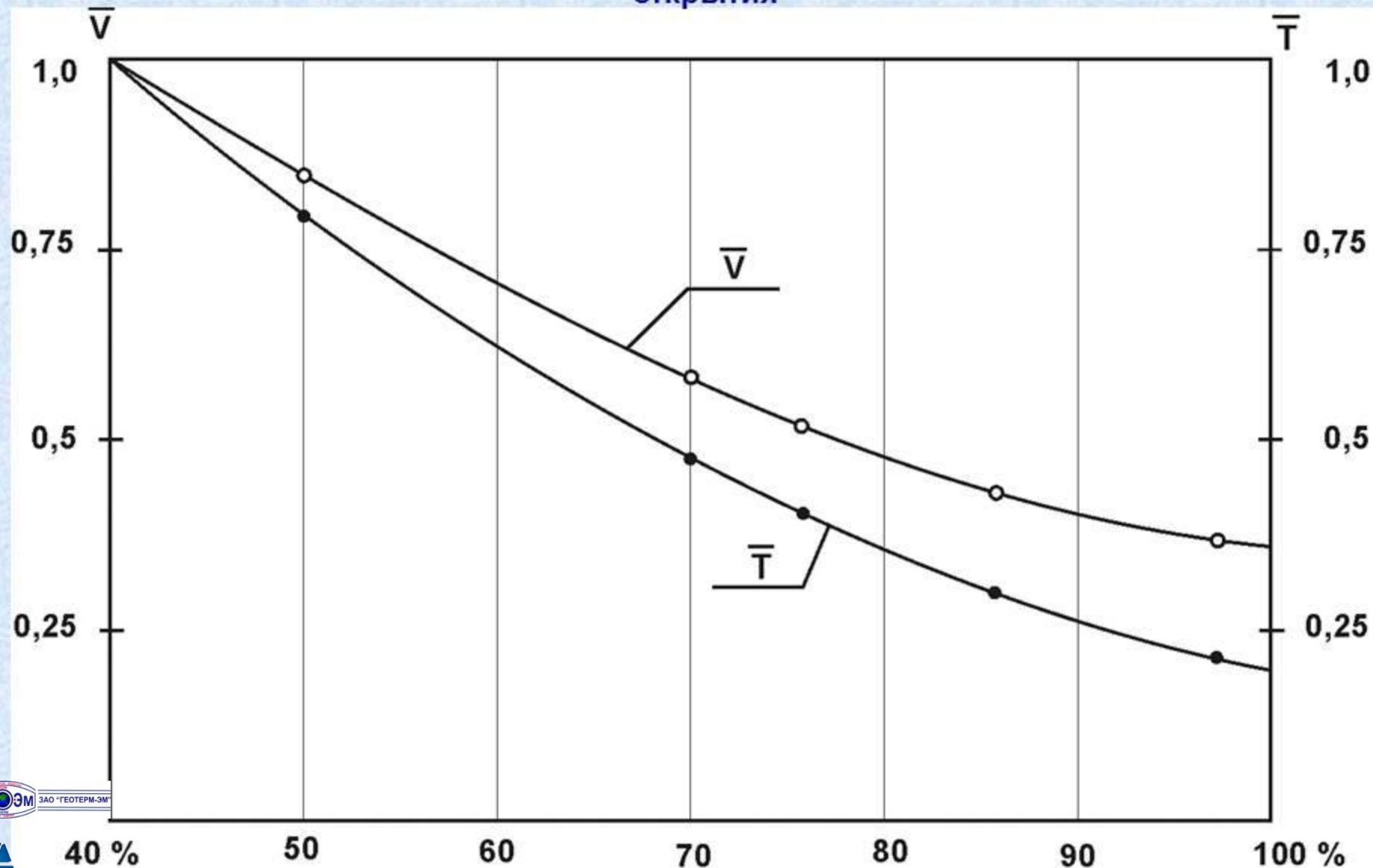
Скалярное поле кинетической энергии турбулентных пульсаций



# Схемы расположения и значения глубины обнаруженных утонений на участках трубопроводов за регулирующими клапанами 2П2-1312 (а) и 2П2-1322 (б)

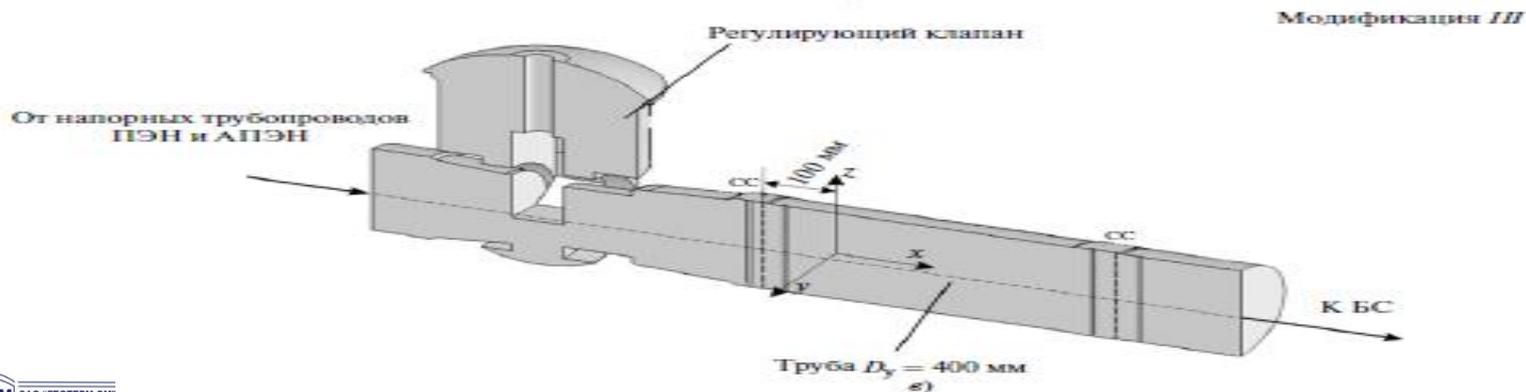
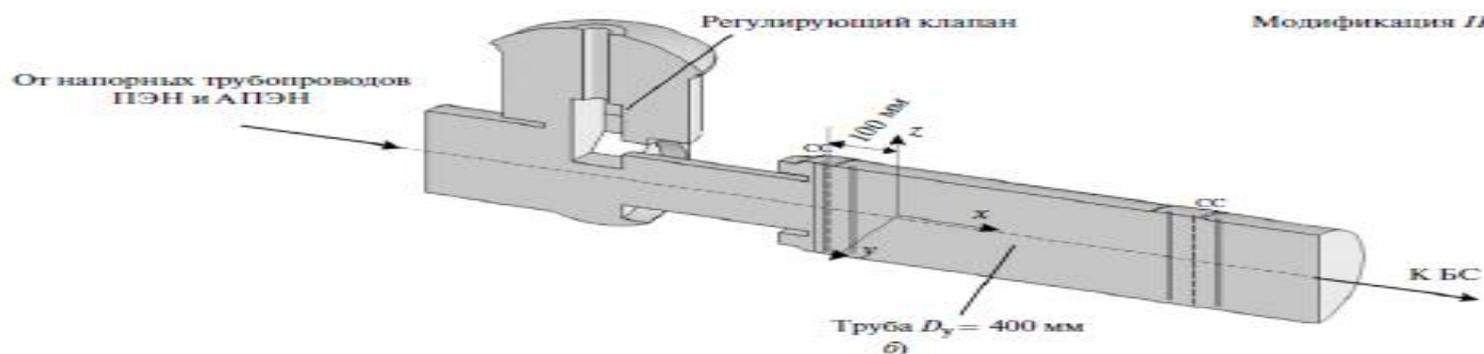
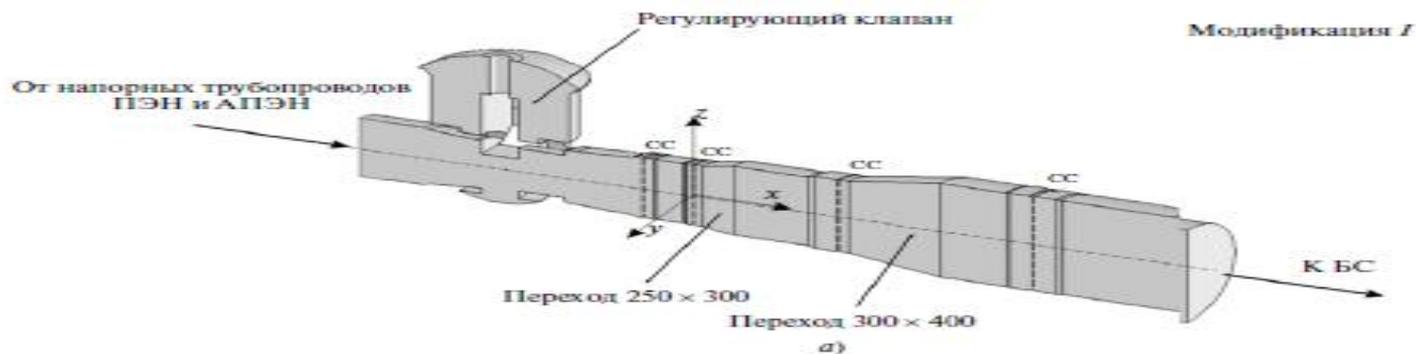


# Зависимость относительных величин максимальных значений скорости и инетической энергии турбулентных пульсаций в пристенной области внутренней поверхности диффузорного участка после клапана 2П1-1312 АЭС от степени его открытия

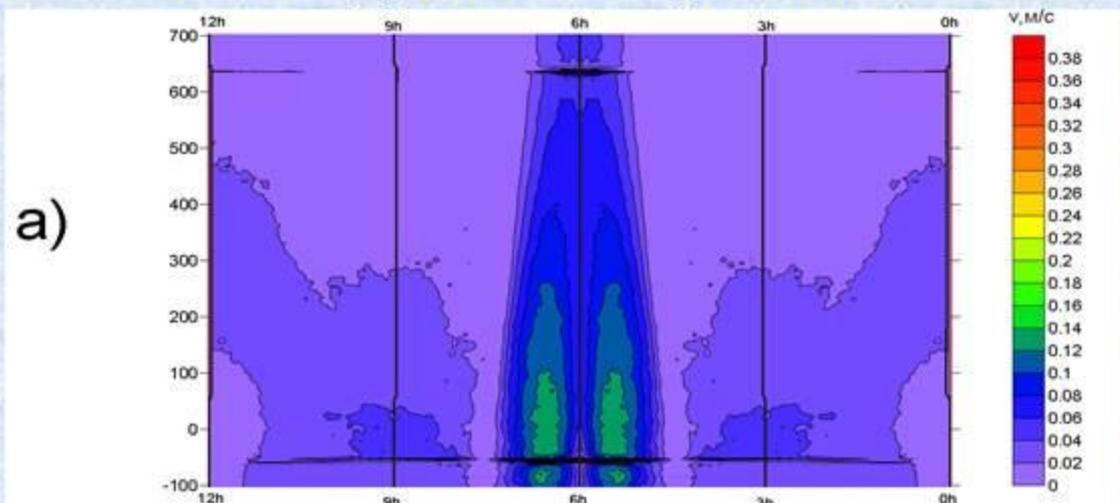


# Модифицированные конструкции с измененной проточной частью узла регулирования подачи питательной воды блоков АЭС :

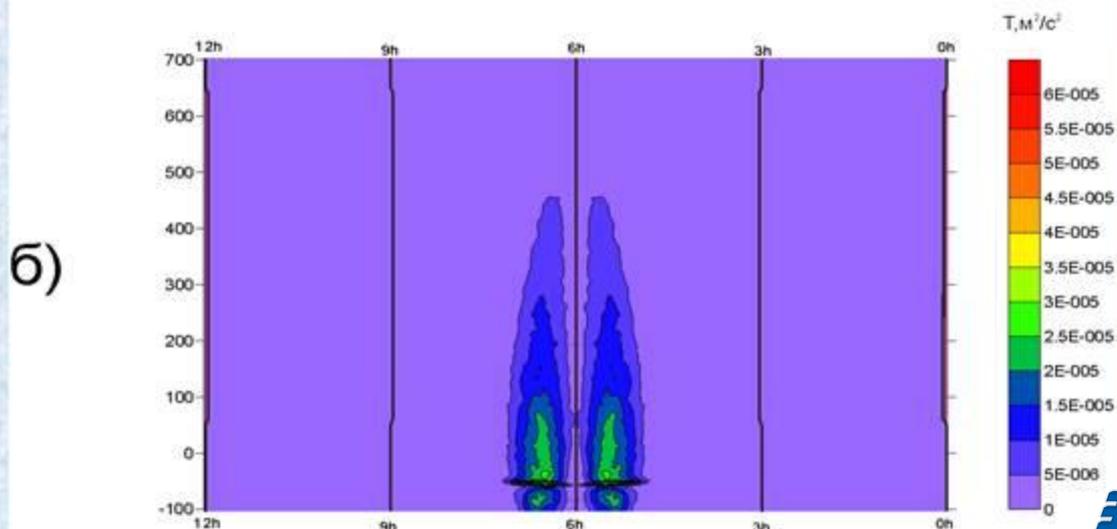
- (а) – без выходной насадки клапана;
- (б) – с клапаном Ду 400;
- (в) – с клапаном Ду 400 и без насадки



Развертка скалярного поля скоростей (а) и кинетической энергии турбулентных пульсаций (б) для конфигурации № III диффузорного участка узла регулирования подачи питательной воды при степени открытия клапана Ду400 без насадки 40 %



Скалярное поле скоростей



поле кинетической энергии турбулентных пульсаций

**Влияние изменения конструкции и геометрии проточной части узла регулирования подачи питательной воды блока АЭС (модификации № I, II, III) на значения характеристик  $\bar{V}$  и  $\bar{T}$ , отражающих интенсивность гидродинамического фактора локальной эрозии-коррозии при 40%м (а) и 100%м (б) открытии клапана:  -  $\bar{V}$ ;  -  $\bar{T}$**

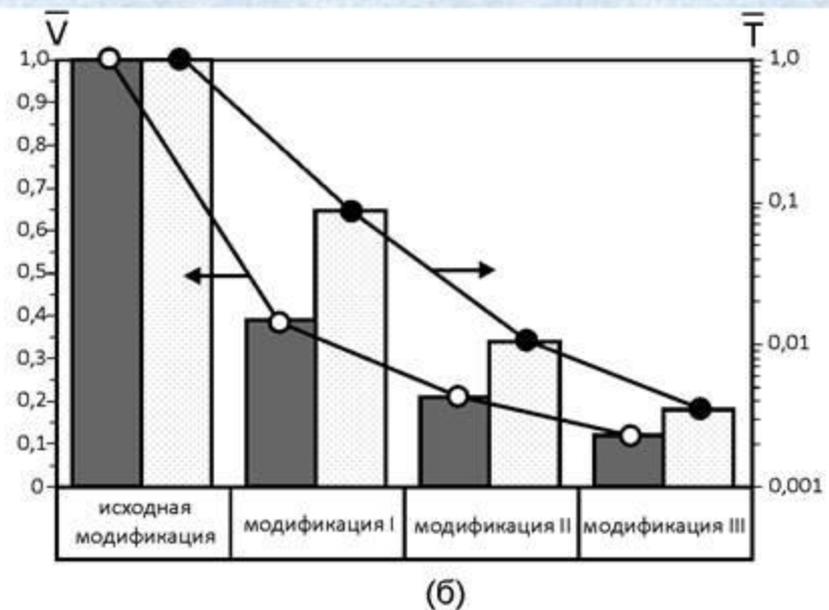
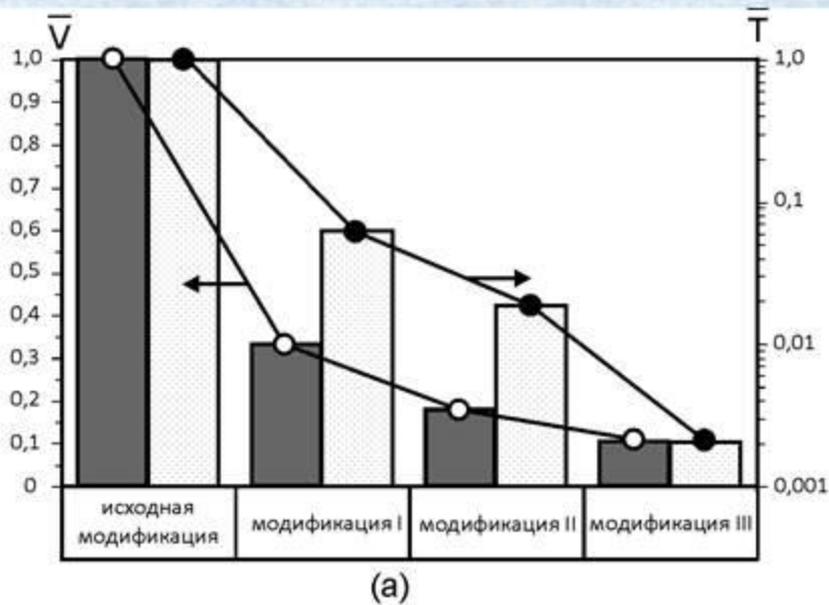
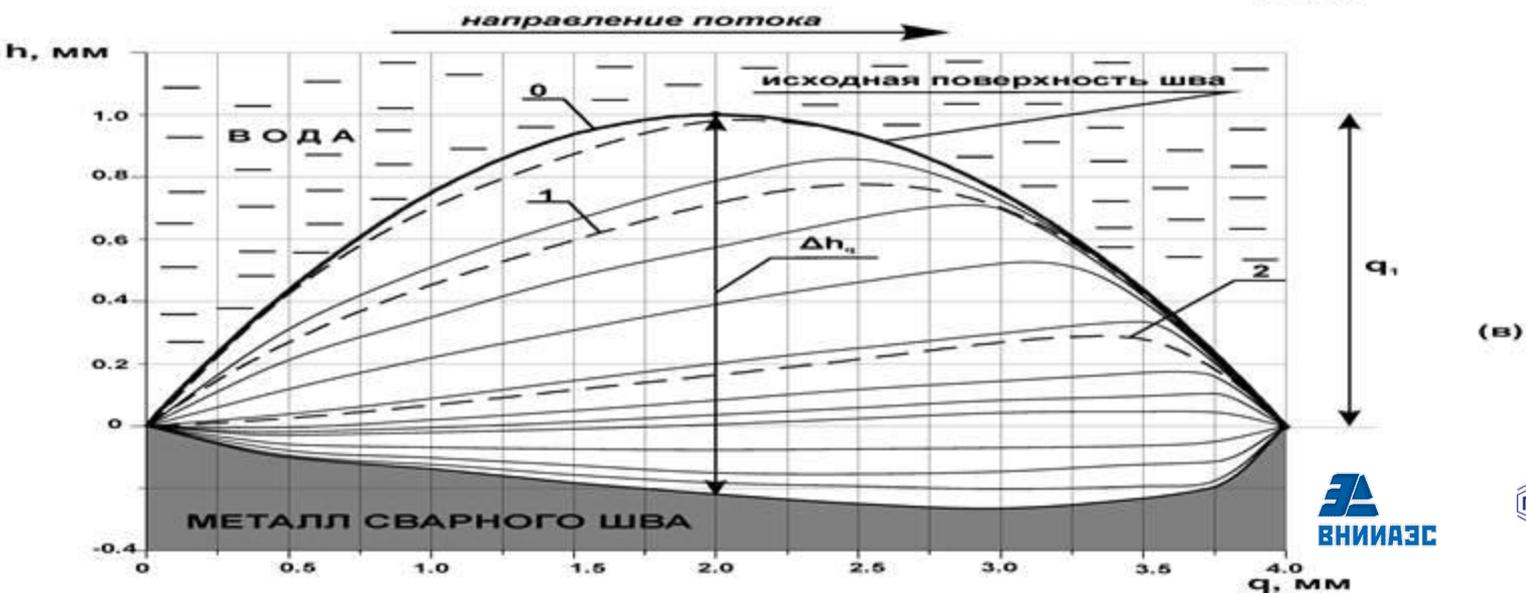
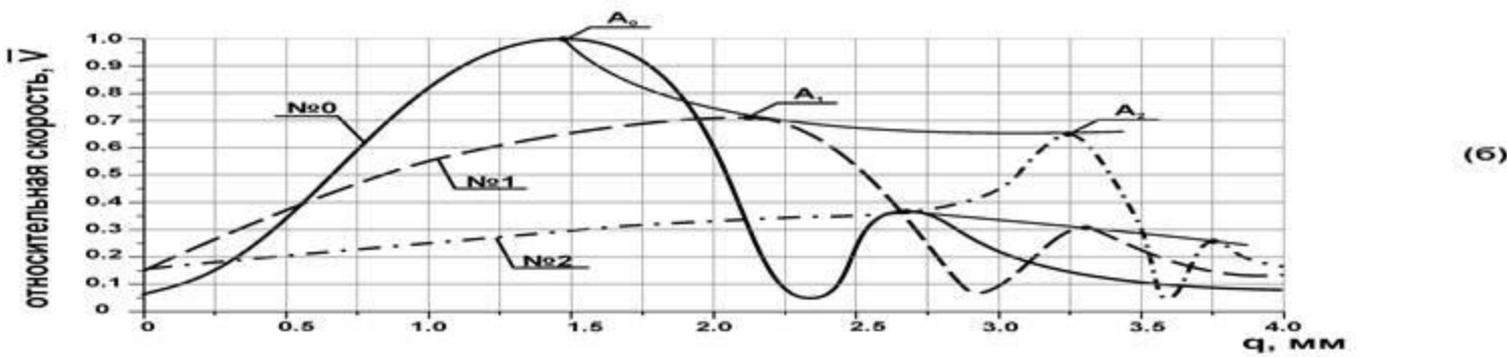
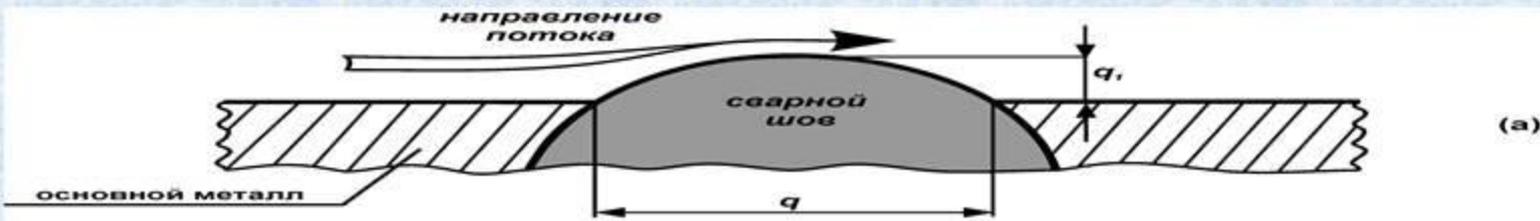
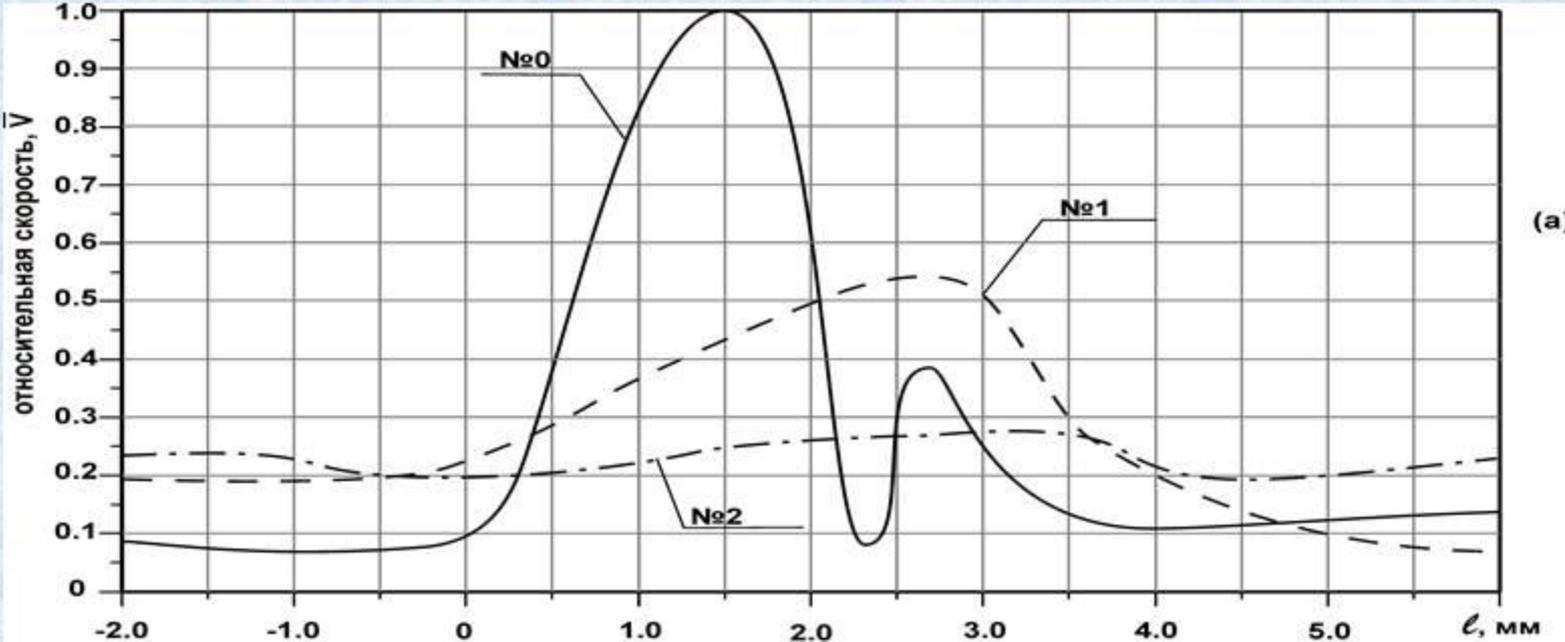


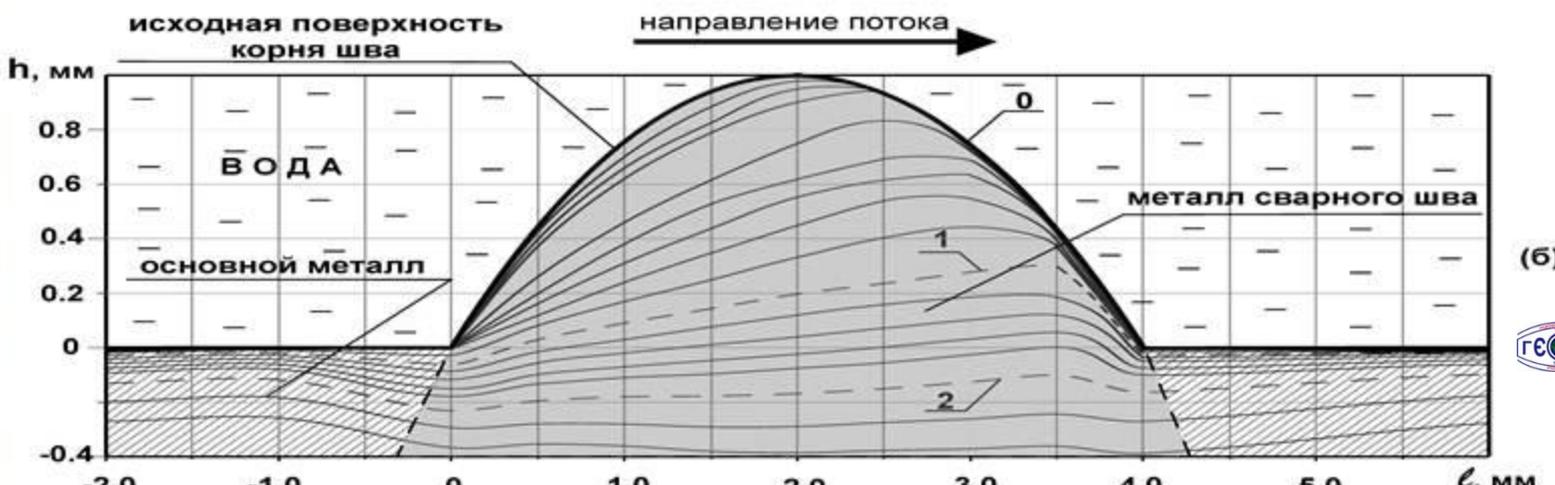
Схема обтекания корня сварного шва (а) и результаты гидродинамического моделирования изменения относительных значений скорости потока в пристенной области (б) и итерации геометрии поверхности шва в процессе его эрозионно-коррозионного утонения (в) № 0, № 1, № 2 – линии изменения скорости потока в пристенной области соответствующие исходной поверхности, а также профилям поверхности шва при 1<sup>ой</sup> и 2<sup>ой</sup> итерациях



**Результаты гидродинамического моделирования изменения относительных величин скорости течения среды в пристенной области (а) и итерации геометрии границы раздела металл-рабочая среда (б) в процессе эрозионно-коррозионного утонения зоны сварного соединения на линейном участке трубопровода**

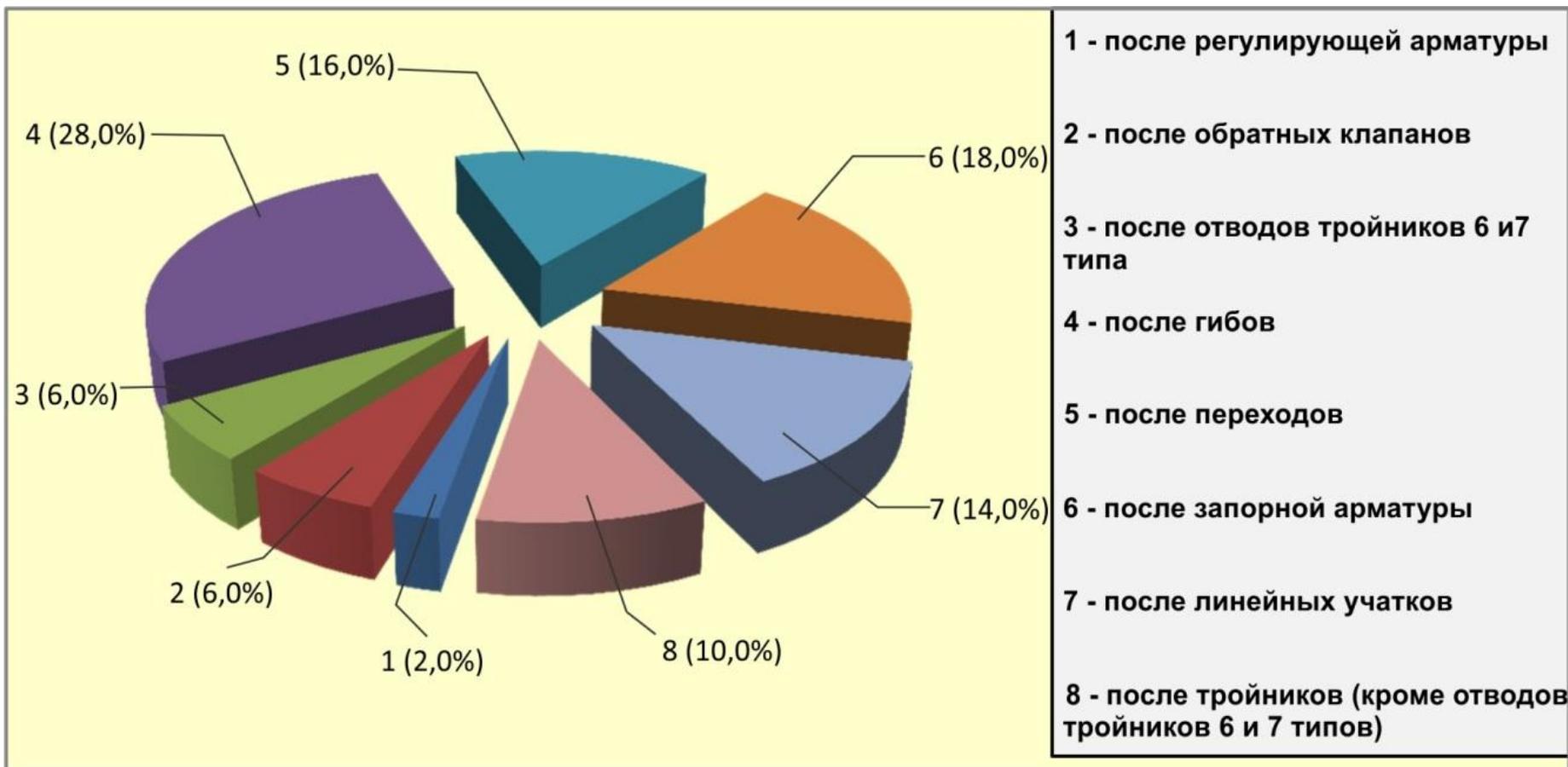


(а)

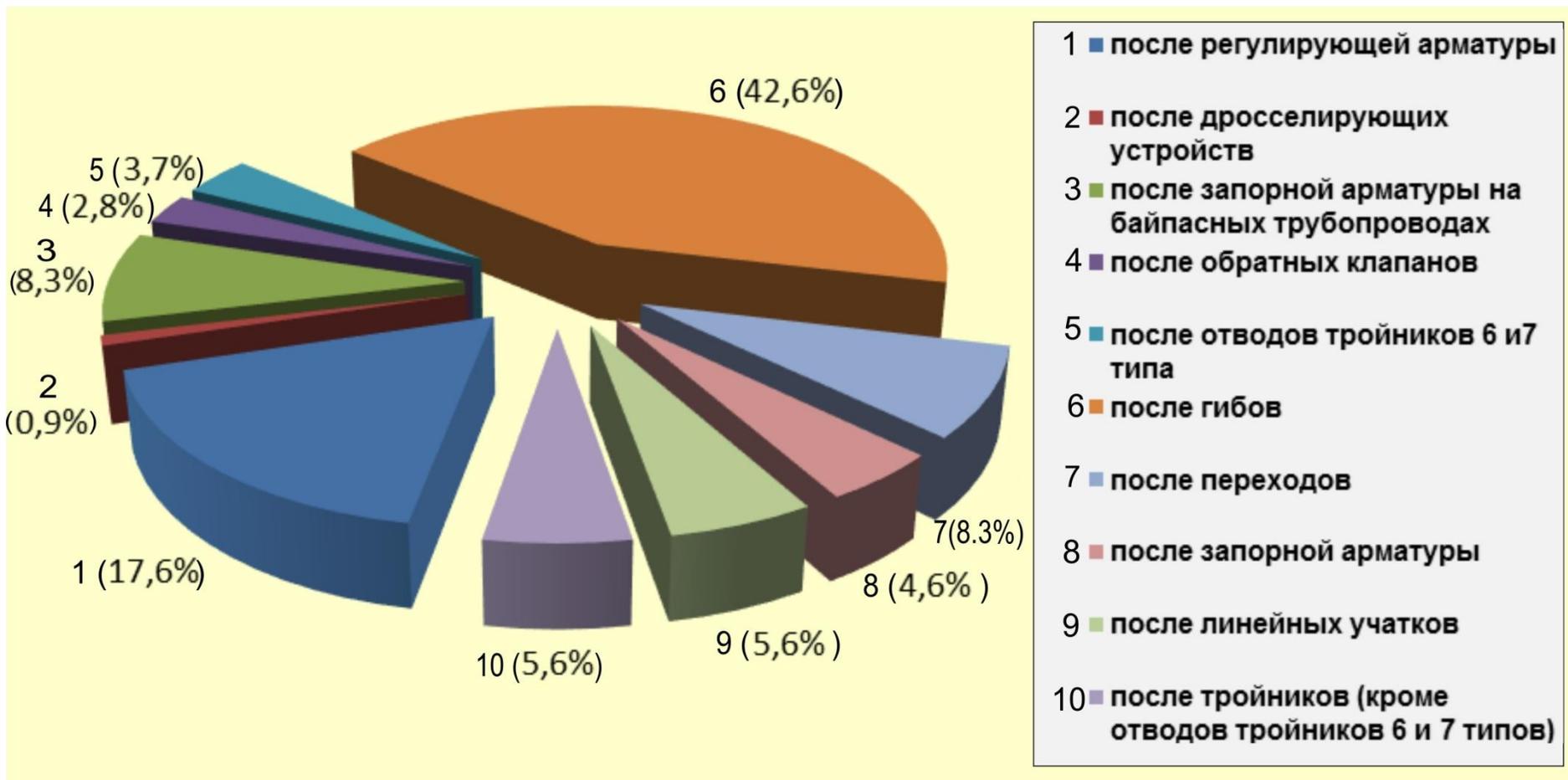


(б)

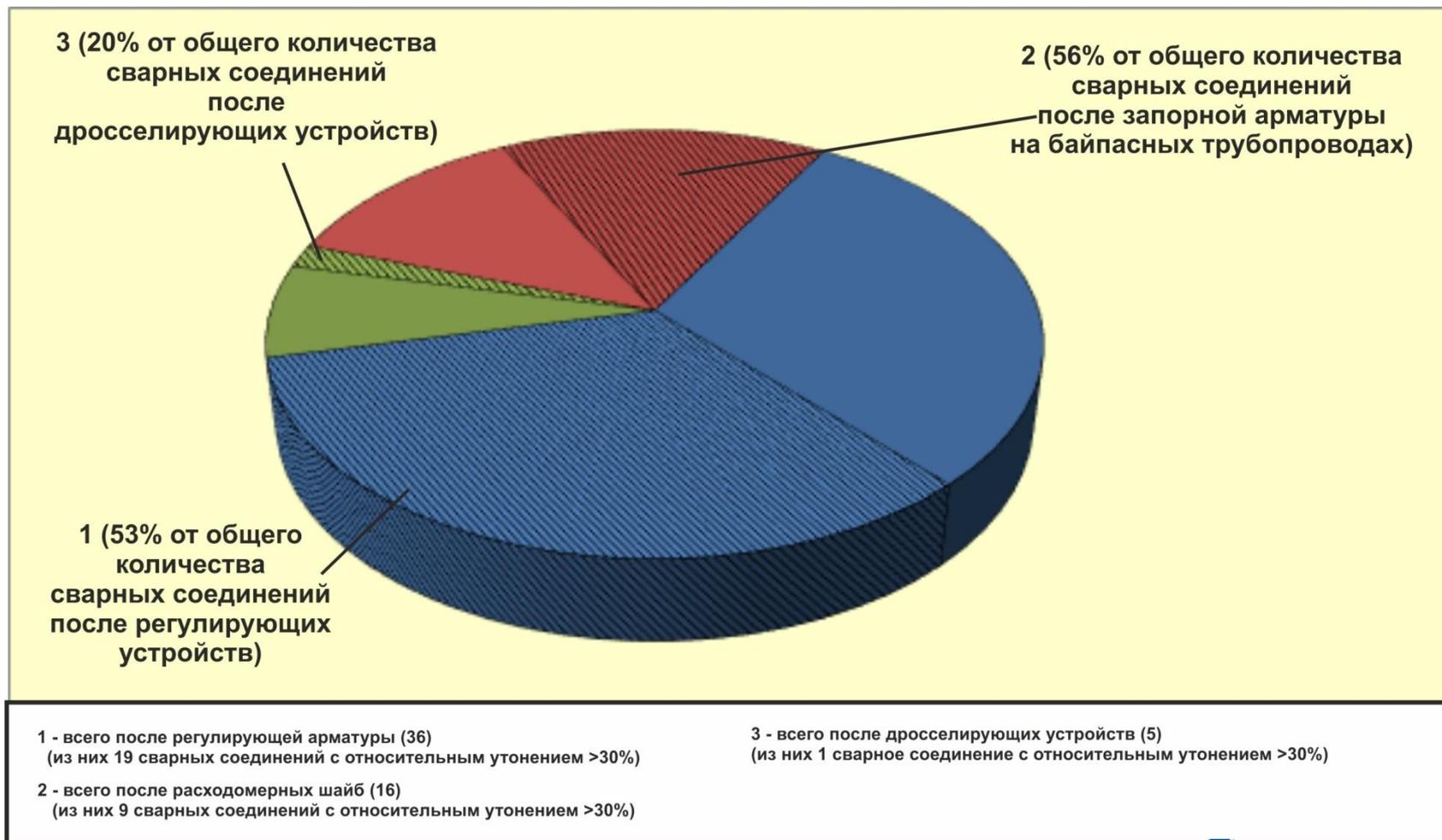
# Статистические сведения о проведенной диагностике сварных соединений трубопроводов питательной воды 2 блока КЛНАЭС с относительным утонением более 30% (50 СС)



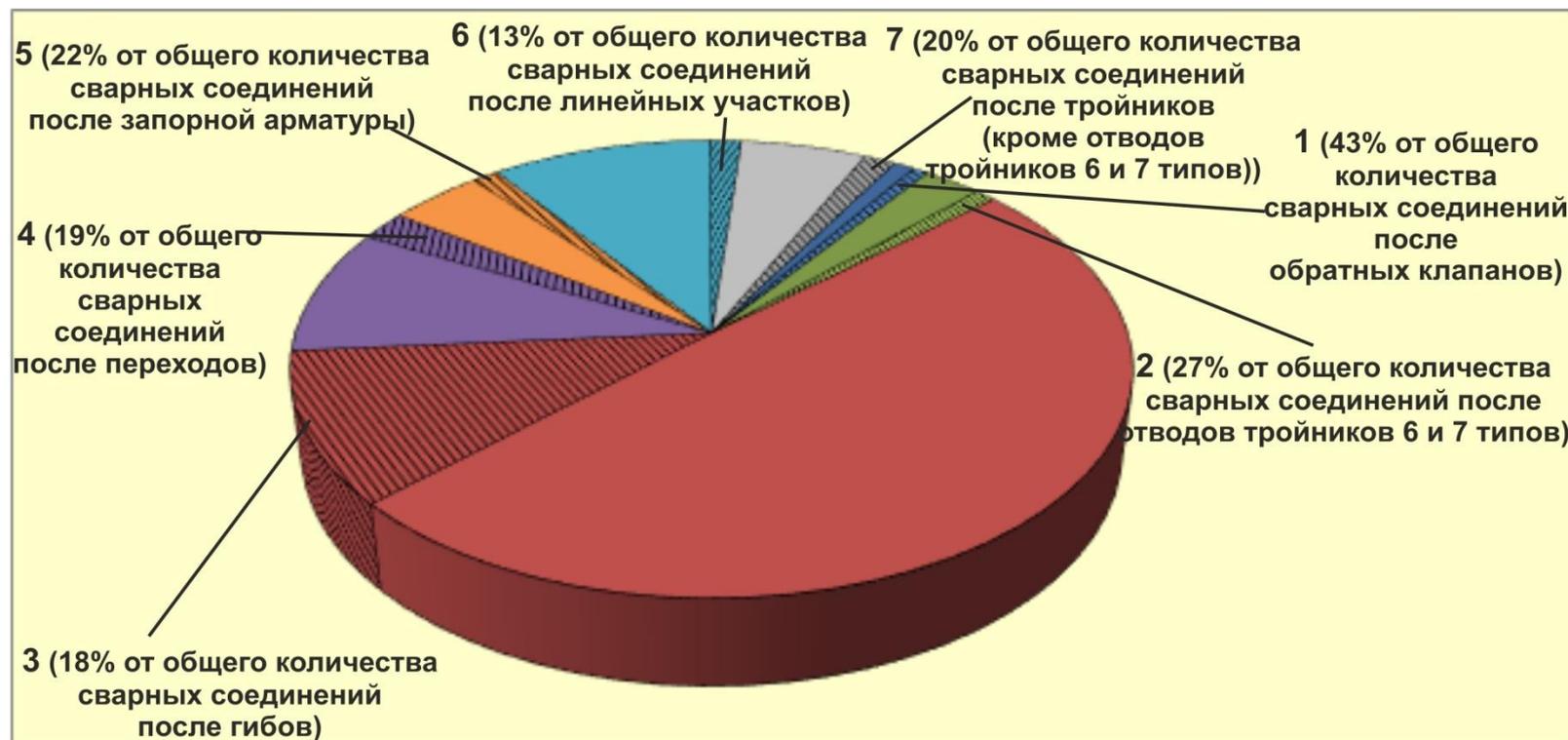
# Статистические сведения о проведенной диагностике сварных соединений трубопроводов конденсата греющего пара 2 блока КЛНАЭС с относительным утонением более 30% (108 СС)



Статистические сведения об элементах трубопроводов конденсата греющего пара 2 блока КЛНАЭС с относительным утонением более 30% относительно общего количества замеренных элементов, подверженных контролю согласно АТПЭ-9-09



# Статистические сведения о результатах толщинометрии сварных соединений трубопроводов конденсата греющего пара 2 блока КЛНАЭС с утонением более 30% относительно общего количества замеренных элементов, не подверженных контролю согласно АТПЭ-9-09



1 - всего после обратных клапанов (7)  
(из них 3 сварных соединения с относительным утонением >30%)

2 - всего после отводов тройников 6 и 7 типа (11)  
(из них 4 сварных соединения с относительным утонением >30%)

3 - всего после гибов (212)  
(из них 46 сварных соединений с относительным утонением >30%)

4 - всего после переходов (38)  
(из них 9 сварных соединений с относительным утонением >30%)

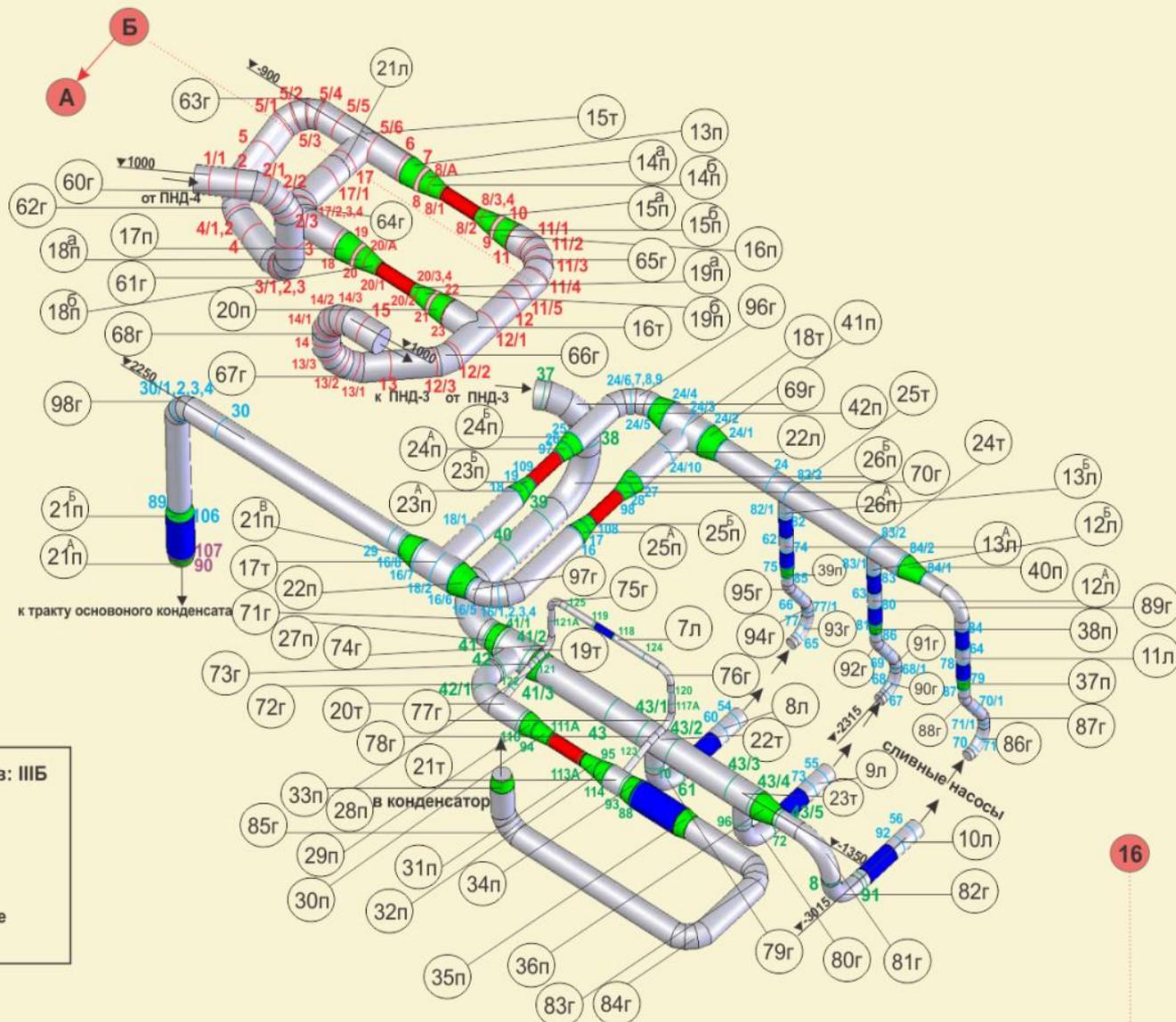
5 - всего после запорной арматуры (18)  
(из них 5 сварных соединений с относительным утонением >30%)

6 - всего после линейных участков (42)  
(из них 6 сварных соединений с относительным утонением >30%)

7 - всего после тройников (кроме отводов тройников 6 и 7 типа) (24)  
(из них 6 сварных соединений с относительным утонением >30%)

# Идентификационная карта элементов трубопроводов КГП от ПНД-4 к ПНД-3 и от ПНД-3 к тракту основного конденсата блока №2 с ВВЭР-1000 КЛНАЭС (сб. черт. Б-802208, сх. 278739 л.38а, 92а, 92б, 103)

22



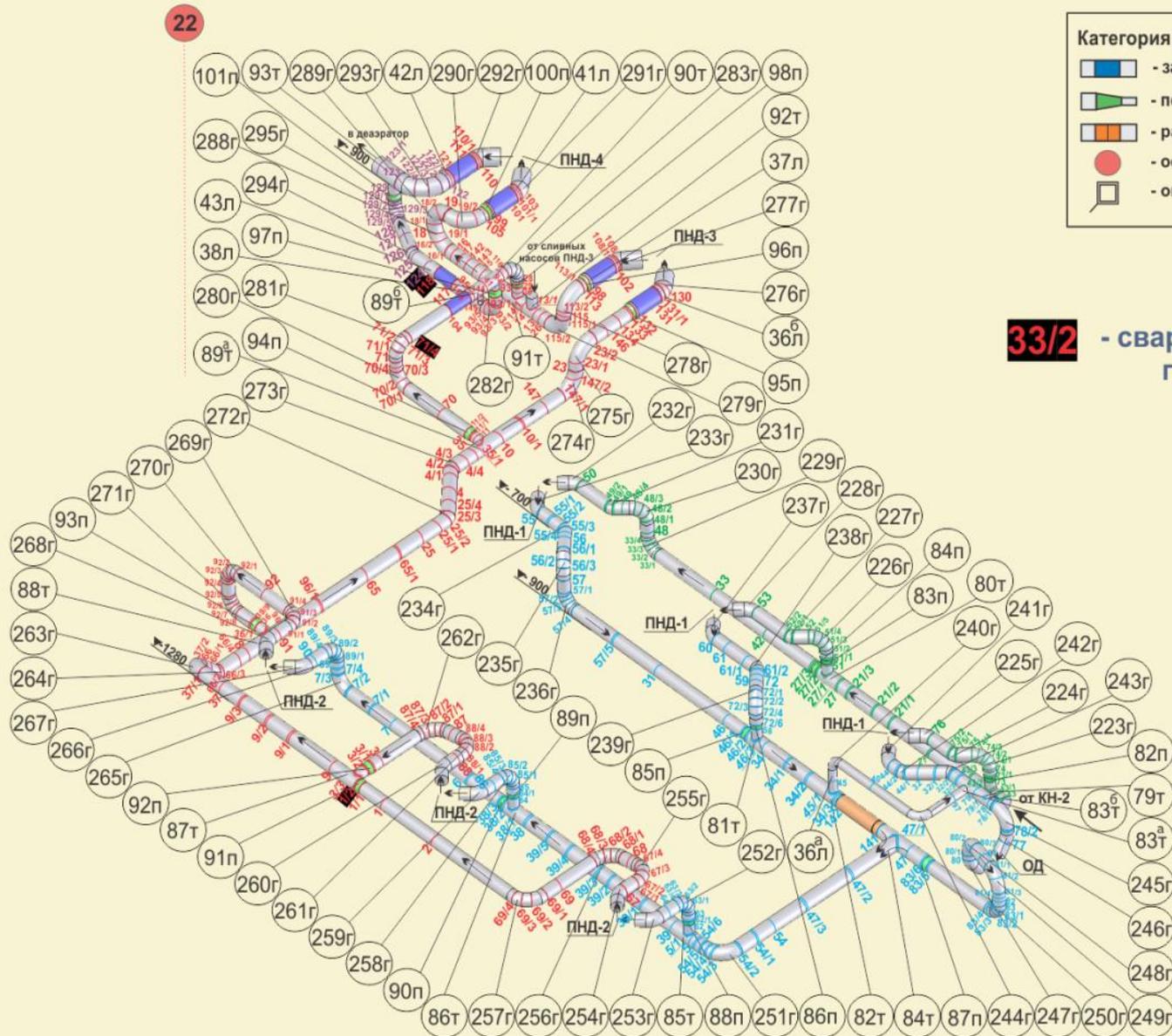
Категория трубопроводов: IIIБ

- запорная арматура
- регуляторы
- переходы
- оси машзала
- опоры неподвижные

16

# Идентификационная карта элементов и сварных соединений трубопроводов основного конденсата блока №2 с ВВЭР-1000 КЛНАЭС

(сб. черт. Б-802207-СБ, сх. 278739 л.103, 103а, 103б, 91а)



Категория трубопроводов: IIIБ, IIIВ

- запорная арматура
- переходы
- расходомерные устройства
- оси машзала
- опоры неподвижные

**33/2** - сварные соединения группы риска

**А** → **Б**

**16**

## **II. Предупреждение разрушений и повышение эрозионно-коррозионной стойкости сварных соединений основных трубопроводов блоков АЭС**

### **Основные задачи:**

- формирование базы данных по техническому состоянию и условиям эксплуатации сварных соединений;
- расчетно-экспериментальное выявление сварных соединений, входящих в группу риска интенсивного утонения;
- обоснование и корректировка типовой программы эксплуатационного контроля основных трубопроводов блоков АЭС в части УЗТ сварных соединений;
- интегрирование программного комплекса по сварным соединениям в ПКПП по проблеме эрозии-коррозии на блоках АЭС.

### **2.3 Работы выполняются на пилотных блоках АЭС с ВВЭР-1000, ВВЭР-440, БН-600**