



Документ No SM01-08

Редакция 0

Декабрь 2008

Архивный No SM01-08/A

**Программный Комплекс для прочностных расчетов
трубопроводов при действии эксплуатационных
и сейсмических нагрузок.**

dPIPE 5

**Пример расчета усталостной прочности и накопленной повреждаемости
тестового трубопровода.**

Россия, Санкт-Петербург 195220, Ул. Гжатская, 9, www.cvs.spb.su
Тел./Факс: +7 (812) 327 8599, +7 (812) 541 9197, E-mail: cvs@cvs.spb.su

9, Gzhatskaya Str., St. Petersburg 195220, Russia, www.cvs.spb.su
Tel./Fax: +7 (812) 327 8599, +7 (812) 541 9197. E-mail: cvs@cvs.spb.su

Содержание

Содержание.....	2
Список рисунков	3
Список таблиц	4
1 Расчетная модель	5
2 Режимы работы трубопровода.....	6
3 Исходные данные для спецификации задания на расчет усталостной прочности в рамках программы dPIPE.	8
4 Алгоритм расчета.....	10
5 Результаты расчета.	12
Приложение I. Файлы исходных данных и результатов расчетов.....	13
Приложение II. Упрощенный упруго-пластический расчет на усталость по формулам	
Приложения 5 ПНАЭ Г-7-002-86	14
Список литературы.....	16

Список рисунков

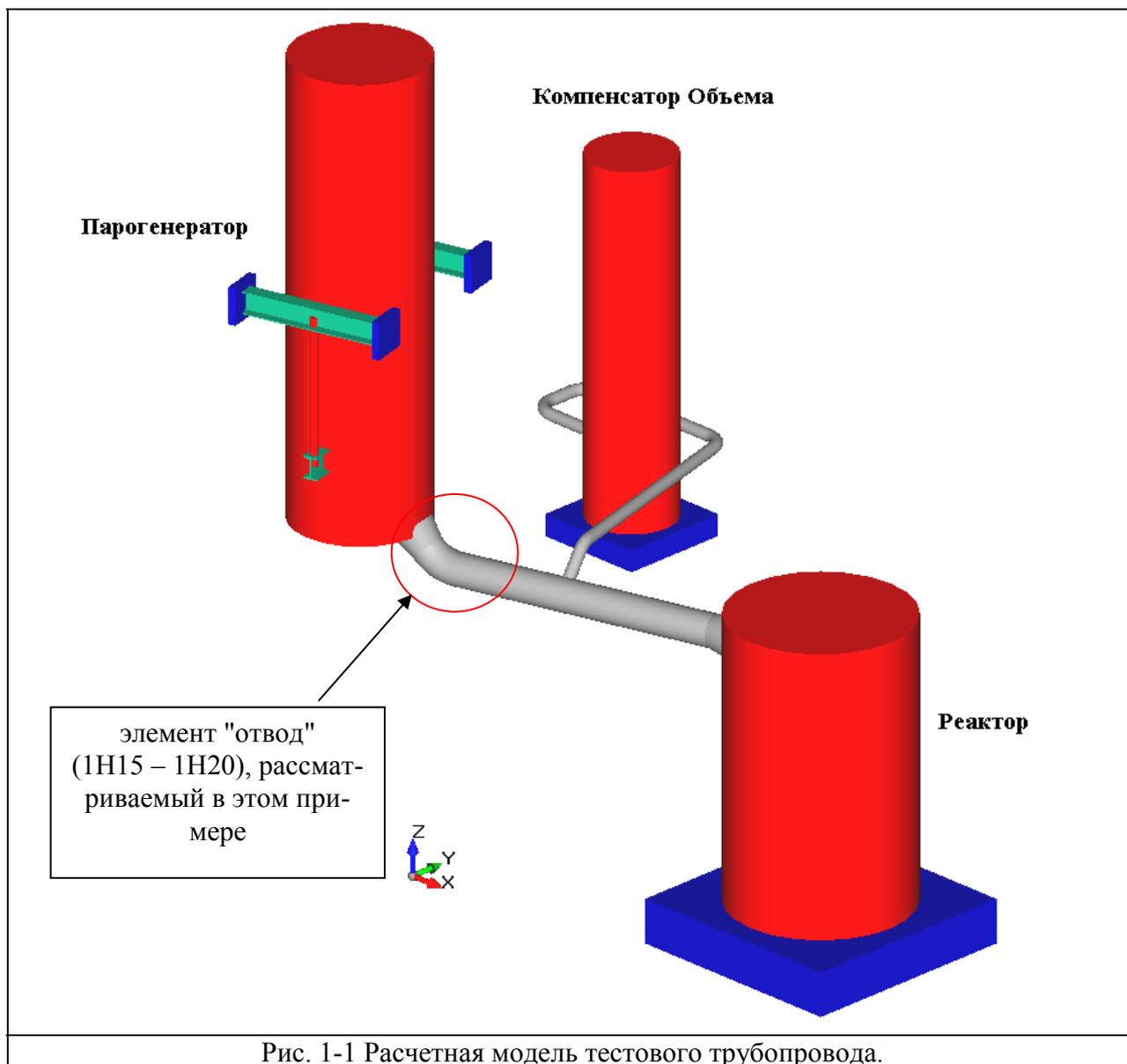
Рис. 1-1 Расчетная модель тестового трубопровода.....	5
Рис. 2-1 Разбиение расчетной модели на нагрузочные группы.	6
Рис. 2-2 История нагружения трубопровода.	7
Рис. 3-1 Диалог задания на расчет циклической прочности.....	9

Список таблиц

Табл. 2-1. Параметры режимов работы тестового трубопровода.	7
Табл. 3-1. Задание на основной расчет	8
Табл. 3-2. Задание на расчет усталостной прочности.	8
Табл. 4-1. Размахи и амплитуды напряжений.	10
Табл. 4-2. Вычисления числа циклов для каждого расчетного случая.	10
Табл. П2-1. Коэффициенты m и n	15

1 Расчетная модель

Расчетная модель тестового трубопровода представляет собой фрагмент трубопроводов реакторной установки 900 МВт PWR, и состоит из реактора, горячей нитки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), соединяющего реактор с вертикально подвешенным парогенератором, а также трубопровода компенсации объема, соединяющего ГЦТ и Компенсатор Объема. Модель изображена на Рис. 1-1. Исходные данные по геометрии трубопровода, его физико-механическим характеристикам и характеристикам опорно-подвесной системы приведены в распечатках ([Приложение I](#)).



2 Режимы работы трубопровода

В зависимости от операционных параметров (температура, давление, содержание среды), тестовый трубопровод разбит на три нагрузочные группы (Рис. 2-1):

LG1 – трубопровод и оборудование, работающие под параметрами главного контура.

LG2 – трубопровод и оборудование, работающие под параметрами компенсатора объема

LG3 – строительные конструкции.

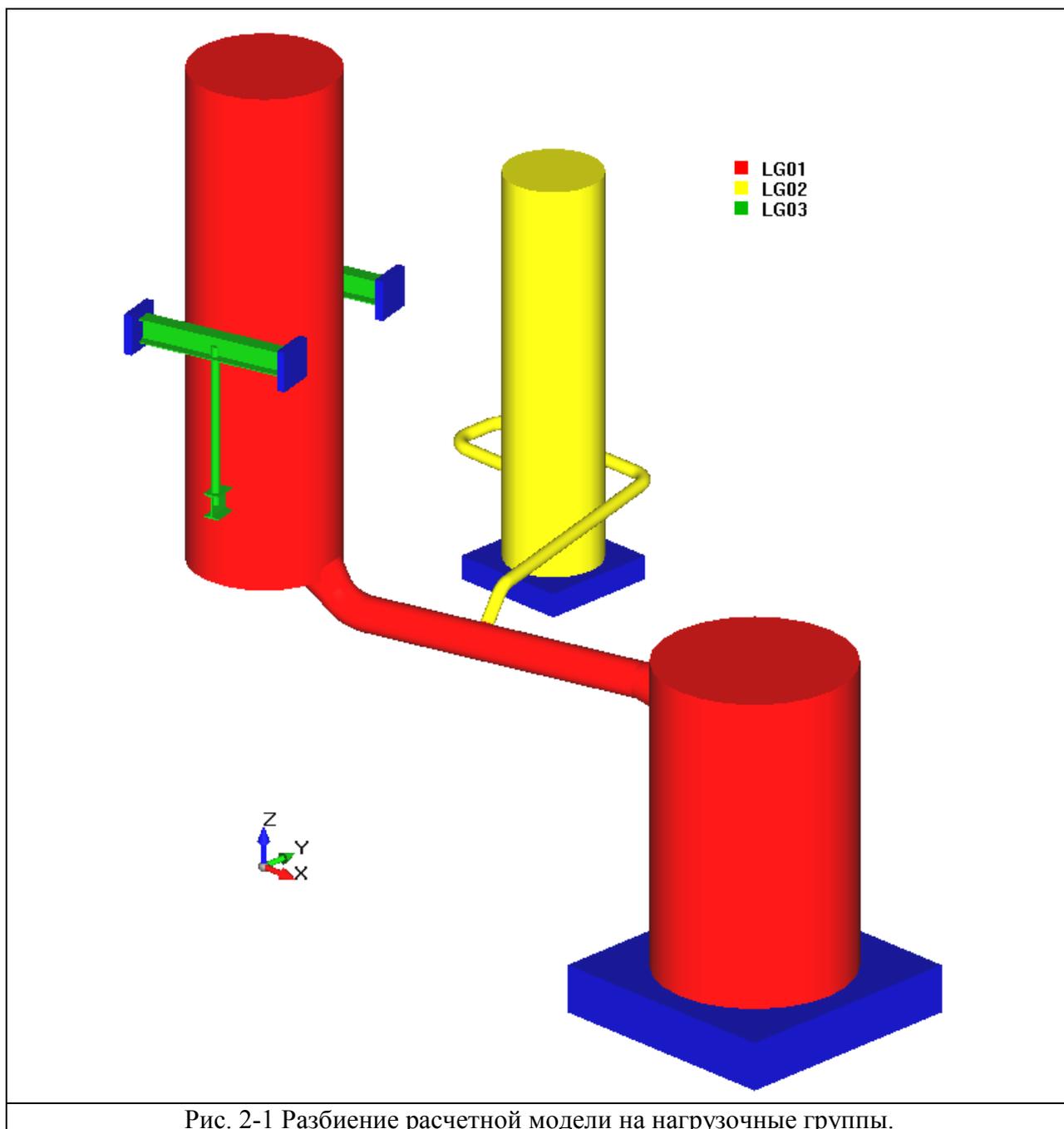


Рис. 2-1 Разбиение расчетной модели на нагрузочные группы.

На Рис. 2-2 изображена условная история нагружения трубопровода и соответствующее число циклов на разных режимах. Данные по режимам работы трубопровода приведены в Табл. 2-1.

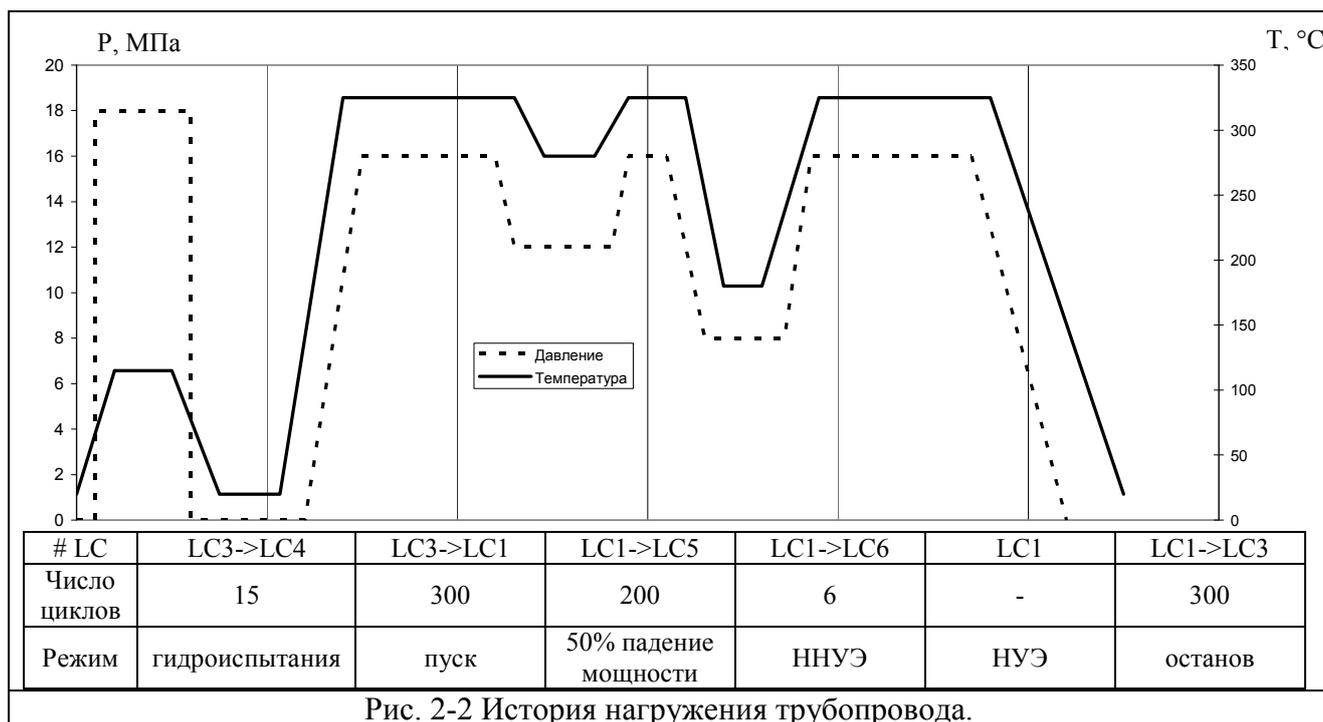


Табл. 2-1. Параметры режимов работы тестового трубопровода.

Обозначение режима	Нагрузочная группа	Температура, °C	Давление, МПа
NOL (Нормальная эксплуатация)	LG01	325	16
	LG02	250	9.4
	LG03	80	0
NNUE (Нарушение нормальной эксплуатации)	LG01	180	8
	LG02	180	8
	LG03	20	0
POWER_50 (50% падение мощности)	LG01	280	12
	LG02	280	12
	LG03	80	0
HTEST (гидроиспытания)	LG01	115	18
	LG02	115	18
	LG03	60	0
\$COLD (холодное состояние)	LG01	20	0
	LG02	20	0
	LG03	20	0

3 Исходные данные для спецификации задания на расчет усталостной прочности в рамках программы dPIPE.

В Табл. 3-1 приведен список расчетных случаев нагружения для проведения основного расчета:

Табл. 3-1. Задание на основной расчет

Обозначение расчетного случая	Тип расчета	Режим работы трубопровода	Набор учитываемых нагрузок ¹⁾	Примечание
LC1	OPER_A	NOL	W+P+T+D	Основной режим (НУЭ)
LC2	SUST_C	NOL	W+P	(2)
LC3	OPER_B	\$COLD	W+P+T+D	(3)
LC4	OPER_B	HTEST	W+P+T+D	режим гидроиспытаний
LC5	OPER_B	POWER_50	W+P+T+D	50% падение мощности
LC6	OPER_B	NNUE	W+P+T+D	режим нарушения НЭ

Примечания:

- 1) *W* – весовая нагрузка; *P* – давление; *T* – нагрузка от компенсации тепловых расширений; *D* – нагрузка от смещения опор;
- 2) Расчетный случай для определения постоянно действующих механических нагрузок (вес+давление). Используется при заданном параметре *PNAE_KE* = 'YES' для проверки уравнения для $(\sigma)_{RK2}$.
- 3) "Холодное состояние" (температура всей системы $T = T_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$, давление $P=0$, среда в трубопроводе отсутствует)

В файле исходных данных приведенному набору вычислений соответствует следующий набор команд:

```
SOLV "Пример расчета усталостной прочности трубопровода"
& LC mod = '$OPER', type = 'OPER_A', pend = 'YES', fric = 'YES', note = "Рабочее состояние" ; LC1
& LC mod = '$OPER', type = 'SUST_C', note = "Вес + давление" ; LC2
& LC mod = '$COLD', type = 'OPER_B', pend = 'YES', fric = 'YES', note = "Холодное состояние" ; LC3
& LC mod = 'HTEST', type = 'OPER_B', pend = 'YES', fric = 'YES', note = "Гидроиспытания" ; LC4
& LC mod = 'POWER_50', type = 'OPER_B', pend = 'YES', fric = 'YES', note = "50% падение мощности" ; LC5
& LC mod = 'NNUE', type = 'OPER_B', pend = 'YES', fric = 'YES', note = "Нарушение НЭ" ; LC6
```

Данные для задания постпроцессорного расчета накопленной повреждаемости приведены в Табл. 3-2. Для их ввода в программу можно воспользоваться диалогом "Усталостная прочность" (меню "сервис – опции – задания – усталостная прочность"), Рис. 3-1.

Табл. 3-2. Задание на расчет усталостной прочности.

Обозначение перехода из одного операционного состояния в другое	История нагружения	Число циклов	Примечания
NC1	LC003 -> LC001	300	Пуск и останов
NC2	LC003 -> LC004	15	Гидроиспытания
NC3	LC001 -> LC005	200	50% падение мощности
NC4	LC001 -> LC006	6	Нарушение НЭ

В файле исходных данных приведенному набору вычислений соответствуют следующие команды:

```
FATG  
& nc = 300, seq = "LC3, LC1"  
& nc = 15, seq = "LC3, LC4"  
& nc = 200, seq = "LC1, LC5"  
& nc = 6, seq = "LC1, LC6"
```

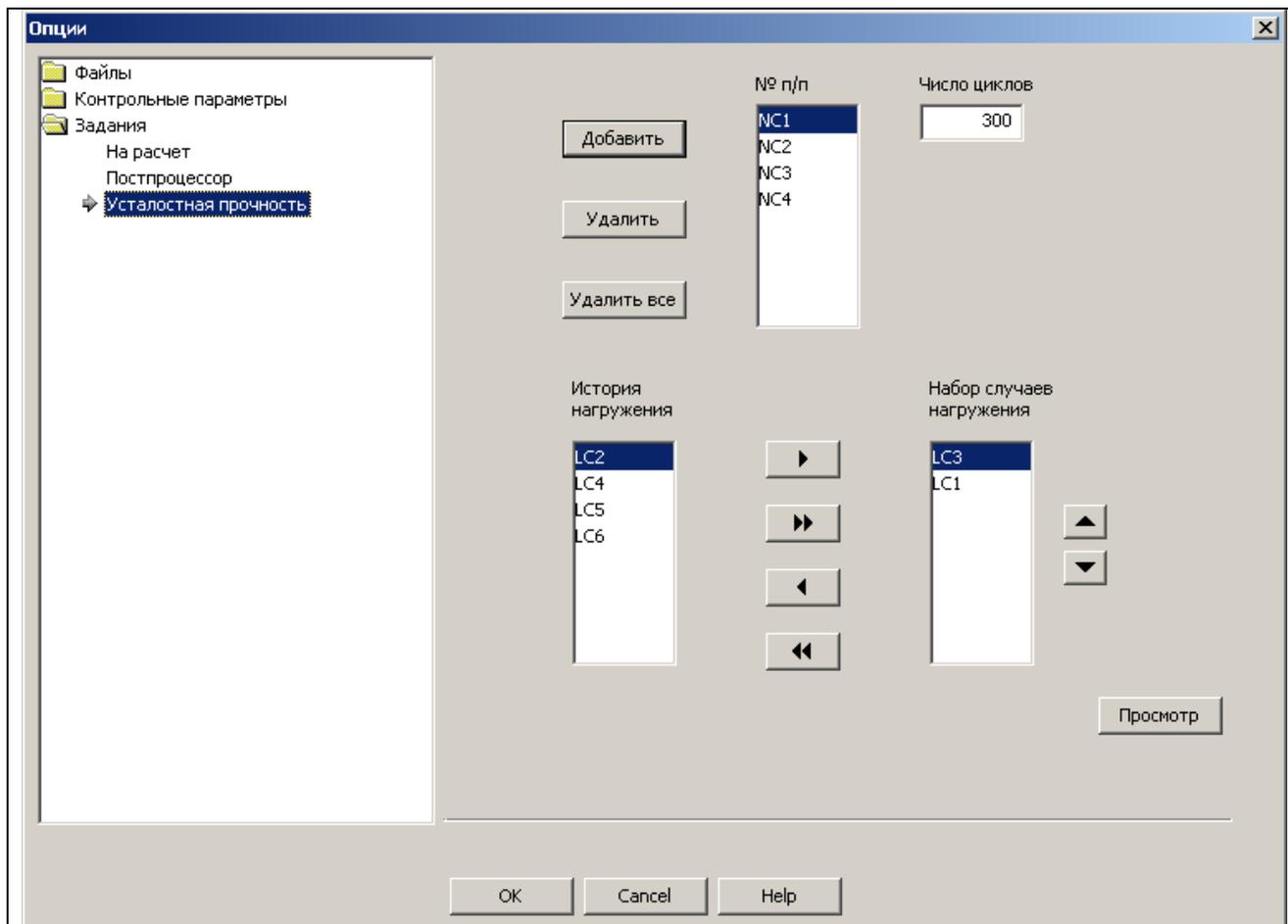


Рис. 3-1 Диалог задания на расчет циклической прочности.

4 Алгоритм расчета.

Процедура расчета накопленной повреждаемости реализуется в соответствии с методикой, изложенной в [1, 2].

1. Вычисляются размахи и амплитуды напряжений между всеми комбинациями нагрузочных состояний, входящих в историю нагружения трубопровода. Методика вычисления амплитуд условных упругих напряжений $(\sigma_a F)_K$ по упрощенному упруго-пластическому методу приведена в [Приложении II](#). В настоящем примере есть 5 нагрузочных векторов: LC1, LC3, LC4, LC5 и LC6. Это соответствует 10 комбинациям переходов из одного состояния в другое (для иллюстрации выбран элемент "отвод" между узлами 1Н15 – 1Н20 (Рис. 1-1), а в Табл. 4-1 приведены напряжения для узла 1Н20:

Табл. 4-1. Размахи и амплитуды напряжений.

N	Сочетание	$(\sigma)_{RK}$, МПа	K_e	$(\sigma_a F)_K$, МПа	Доп. число циклов
1	LC3->LC1	727	1.431	364	1007
2	LC3->LC4	321	1	125	88266
3	LC3->LC5	604	1	210	7411
4	LC3->LC6	353	1	124	90515
5	LC1->LC4	439	1	151	44111
6	LC1->LC5	122	1	44	1000000
7	LC1->LC6	374	1	131	76799
8	LC4->LC5	382	1	150	49468
9	LC4->LC6	196	1	107	177214
10	LC5->LC6	251	1	86	1000000

2. Каждое "состояние" системы в соответствие с заданной историей нагружений может встречаться в переходах из одного операционного состояния в другое N раз:

Табл. 4-2. Вычисления числа циклов для каждого расчетного случая.

	N	Примечание
LC3	315	300 (NC1) + 15 (NC2)
LC4	15	15 (NC2)
LC1	506	300 (NC1) + 200 (NC3) + 6 (NC4)
LC6	6	6 (NC4)
LC5	200	200 (NC3)

3. Среди полученных результатов (Табл. 4-1) отыскивается максимум по $(\sigma_a F)_K$ и в соответствие с величиной этого напряжения из кривой усталости определяется допускаемое число циклов $N_{доп}$, на основании чего определяется вклад сочетания "LC_i-LC_j" в накопленную повреждаемость:

$$UF_{i-j} = N_{i-j}/N_{доп},$$

где N_{i-j} – минимальное число циклов для LC_i и LC_j из таблицы 5. После этого число циклов для каждого соответствующего состояния уменьшается на величину N_{i-j} и

процедура повторяется, причем комбинации, в которых присутствуют LC с нулевым числом циклов в дальнейшем не рассматриваются. Табл. 4-3 иллюстрирует эту процедуру:

Табл. 4-3. Алгоритм расчета накопленной повреждаемости в элементах трубопровода

Нагрузочные вектора	Начальное Число циклов	Последовательность расчетов:			
		1	2	3	4
LC3	315	0	0	0	0
LC4	15	15	0	0	0
LC1	506	191	176	170	0
LC6	6	6	6	0	0
LC5	200	200	200	200	30
Учтенное число циклов:		315 (LC3->LC1)	15 (LC1->LC4)	6 (LC1->LC6)	170 (LC1->LC5)

N	Сочетания нагрузок	$(\sigma_a F)_K$, МПа	Допустимое число циклов	Учитываемое число циклов	вклад в накопленную повреждаемость (UF)
1	LC3->LC1	364	1007	315	0.312810
2	LC3->LC4	125	88266		
3	LC3->LC5	210	7411		
4	LC3->LC6	124	90515		
5	LC1->LC4	151	44111	15	0.000340
6	LC1->LC5	44	1000000	170	0.000170
7	LC1->LC6	131	76799	6	0.000078
8	LC4->LC5	150	49468		
9	LC4->LC6	107	177214		
10	LC5->LC6	86	1000000		

4. Суммарная накопленная повреждаемость для рассматриваемого узла вычисляется как сумма всех вкладов $UF_{i,j}$:

$$CUF = \sum UF_{i,j}$$

5 Результаты расчета.

Результаты расчета записываются в файл <имя задачи>.res и представляют собой таблицу следующего вида:

```

>>> Таблица 1. Максимальные напряжения (расчет усталостной прочности)
-----
элемент узел1 узел2 Eq. LC_i LC_j нач. серед. конец допуск. FS UF CUF
-----
...
BEND 1H15 1H20
Srк 3 1 621.33 690.12 726.95 565.42 1.29 !
S"rk 3 1 490.06 559.27 596.44 598.00 1.00
S"rk 3 4 147.78 147.40 147.08 640.60 0.23
Afk 3 1 237.41 317.32 364.34 [003 - 001] --> 0.312810 0.313399
...
-----
Максимальная накопленная повреждаемость: CUF = 0.313 (BEND 1H15 - 1H20)

```

Поля этой таблицы имеют следующие значения:

элемент.	–	тип элемента расчетной модели трубопровода;
узел1, узел2	–	узлы, ограничивающие элемент;
Eq.	–	категория напряжений;
LC_i, LC_j	–	сочетание нагрузок, определяющее максимальную величину для соответствующей категории напряжений;
нач., серед., конец	–	точки по длине элемента;
допус.	–	допускаемые напряжения;
FS	–	отношение расчетного параметра к допускаемому (при FS > 1 в конце соответствующей строки появляется восклицательный знак)
UF	–	вклад в накопленную повреждаемость от сочетания нагрузок, указанных в квадратных скобках. В настоящем примере – это LC003 - > LC001
CUF	–	максимальная суммарная накопленная повреждаемость для всего элемента.

В конце таблицы печатается максимальная накопленная повреждаемость для всей расчетной модели с указанием соответствующего элемента. Условие циклической прочности считается выполненным при CUF < 1. При просмотре результатов при помощи PIPE3DV для каждого элемента выводятся максимальные среди всех режимов напряжения категорий (σ)_{РК} и (σ_a F)_К, а также величины накопленной повреждаемости.

Приложение I. Файлы исходных данных и результатов расчетов.

Файлы, приведенные ниже, находятся в электронном приложении к настоящему документу.

Расчетная модель	Листинг исходных данных	Результаты расчета
 fat_test.dp5	 fat_test.out	 fat_test.res

Приложение II. Упрощенный упруго-пластический расчет на усталость по формулам Приложения 5 ПНАЭ Г-7-002-86

Приведенная ниже методика основывается на положениях норм ASME BPVC для расчетов трубопроводов первого класса на прочность (раздел NB-3600, [3]). При разработке настоящей методики также использовались данные, приведенные в аналогичных немецких нормах КТА [4] и представленные в литературе, [5].

В случае невыполнения условия прочности по категории напряжений $(\sigma)_{RK}$ (проверка условия приспособляемости трубопровода):

$$(\sigma)_{RK} \leq \min \left\{ \left(2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) R_{p0,2}^T ; 2R_{p0,2}^T \right\} \quad (\text{П2-1})$$

выполняется альтернативный анализ для дополнительных категорий напряжений $(\sigma)_{RK1}$ и $(\sigma)_{RK2}$, где:

- $(\sigma)_{RK1}$ - напряжения, вычисленные по формулам п. 2.3.2 Приложения 5 Норм [6], включающие силовые факторы только для размаха внутренних усилий от температурного расширения и температурного смещения опор трубопровода. Эти напряжения являются аналогом уравнения (12) ASME NB-3600.
- $(\sigma)_{RK2}$ - напряжения, вычисленные по формулам п. 2.3.2 Приложения 5 Норм, включающие силовые факторы только для размаха внутреннего давления и внутренних усилий от весовой нагрузки трубопровода. Дополнительно, в категорию напряжений $(\sigma)_{RK2}$ включаются мембранные температурные напряжения $(\sigma)_T''$, вызванные осевым перепадом температуры. Эти напряжения являются аналогом уравнения (13) ASME NB-3600.

Новое условие прочности (проверка приспособляемости) при этом формулируется следующим образом:

$$(\sigma)_{RK}' \leq 2R_{p0,2}^T \text{ и } (\sigma)_{RK}'' + (\sigma)_T'' \leq 2R_{p0,2}^T \quad (\text{П2-2})$$

При выполнении последнего условия для проверки малоциклового усталости используются напряжения:

$$(\sigma_{aF})_K' = K_e (\sigma_{aF})_K, \quad (\text{П2-3})$$

где $(\sigma_{aF})_K$ - амплитуда напряжений, вычисленная по п. 2.3.3 Приложения 5 Норм, а коэффициент K_e вычисляется по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} K_e &= 1.0 \text{ если } (\sigma)_{RK} \leq 2R_{p0,2}^T \\ &= 1.0 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left(\frac{(\sigma)_{RK}}{2R_{p0,2}^T} - 1 \right) \text{ если } 2R_{p0,2}^T < (\sigma)_{RK} < 2mR_{p0,2}^T \\ &= \frac{1.0}{n} \text{ если } (\sigma)_{RK} \geq 2mR_{p0,2}^T \end{aligned} \quad (\text{П2-4})$$

Коэффициенты n и m , входящие в (П2-4) принимаются в зависимости от материала трубопровода в соответствии с таблицей П2-1:

Табл. П2-1. Коэффициенты m и n

Материал	m	n	Tmax (°C)
Углеродистая сталь	3.0	0.2	370
Низколегированная сталь	2.0	0.2	370
Аустенитная нержавеющая сталь	1.7	0.3	425

Список литературы.

1. W. B. Wright and E. C. Rodabaugh, "A Method of Computing Stress Range and Fatigue Damage in a Nuclear Piping System", Nuclear Engineering and Design 22, 318-325 (1972).
2. Sample Analysis of a Piping System Class 1 Nuclear, prepared by Working Group on Piping of the Design Subgroup of the Nuclear Power Committee of the ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, NY,
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Edition 2004. ASME, New York, 2004.
4. Safety Standards of the Nuclear Safety Standards Commission (KTA), KTA 3201.2, Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors, Part 2: Design and Analysis
5. Gerry C. Slagis, "Meaning of K_e in Design-by-Analysis Fatigue Evaluation", Transactions of the ASME, Vol. 128, February 2006
6. ПНАЭ Г-7-002-86 "Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок"