



Документ No SM01-08

Редакция 3

Май 2022

Архивный No SM01-08/A

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

dPIPE 5

**Пример расчета усталостной прочности и накопленного повреждения
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.	11
5 Результаты расчета.	13
Приложение I. Файлы исходных данных и результатов расчетов.	14
Приложение II. Упрощенный упруго-пластический расчет на усталость по формулам	
Приложения 5 ПНАЭ Г-7-002-86	15
Список литературы.	17

Список рисунков

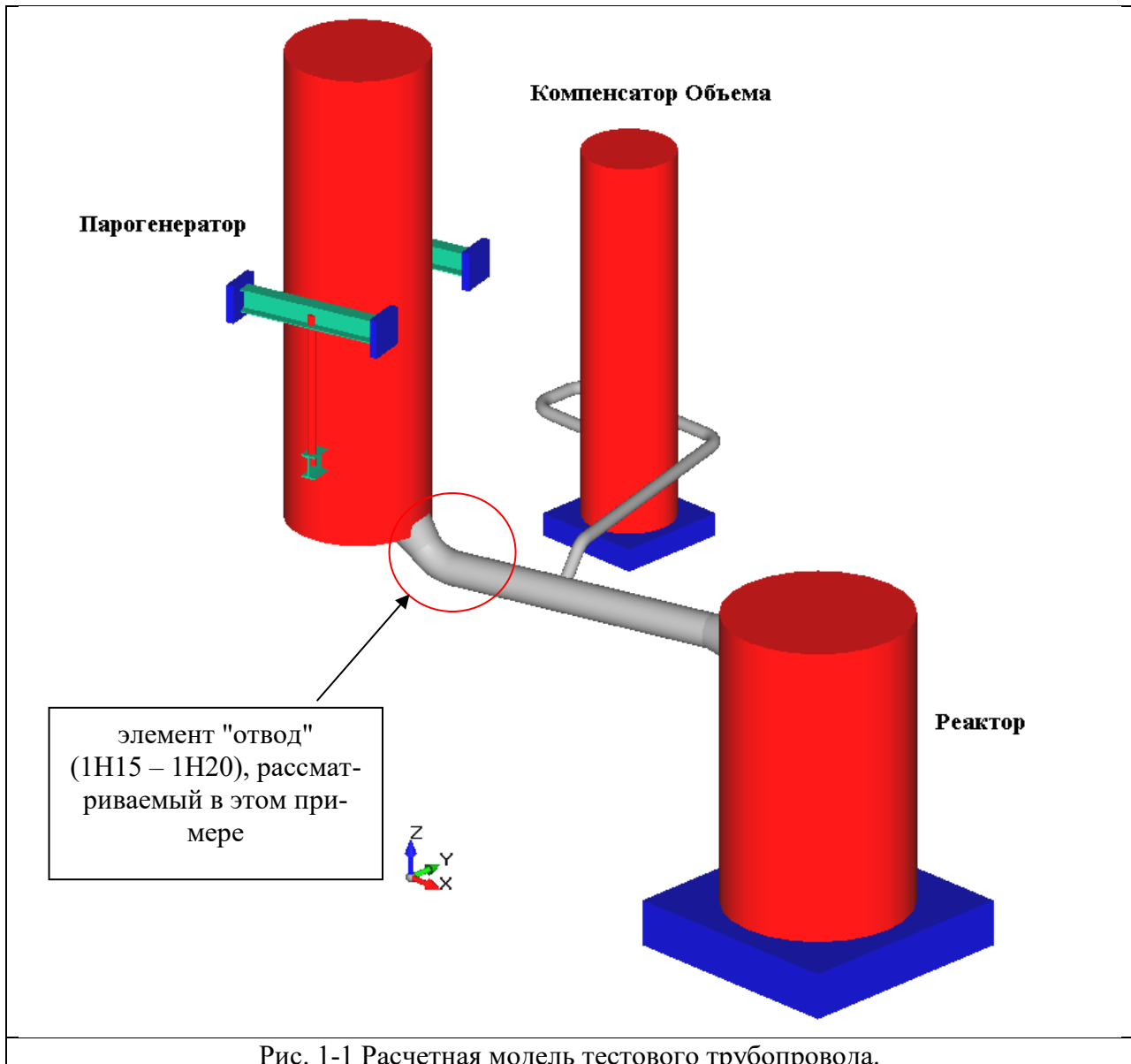
Рис. 1-1 Расчетная модель тестового трубопровода.....	5
Рис. 2-1 Разбиение расчетной модели на нагрузочные группы.	6
Рис. 2-2 История нагружения трубопровода.	7
Рис. 2-3 Поэтажные спектры ответа, соответствующие МРЗ. Демпфирование 2%.....	8
Рис. 3-1 Диалог задания на расчет циклической прочности.....	10

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.	9
Табл. 4-1. Размахи и амплитуды напряжений.	11
Табл. 4-2. Вычисления общего числа циклов для каждого расчетного случая.	11
Табл. 4-3. Алгоритм расчета накопленного повреждения в элементах трубопровода	12
Табл. П2-1. Коэффициенты m и n	16

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](#)).



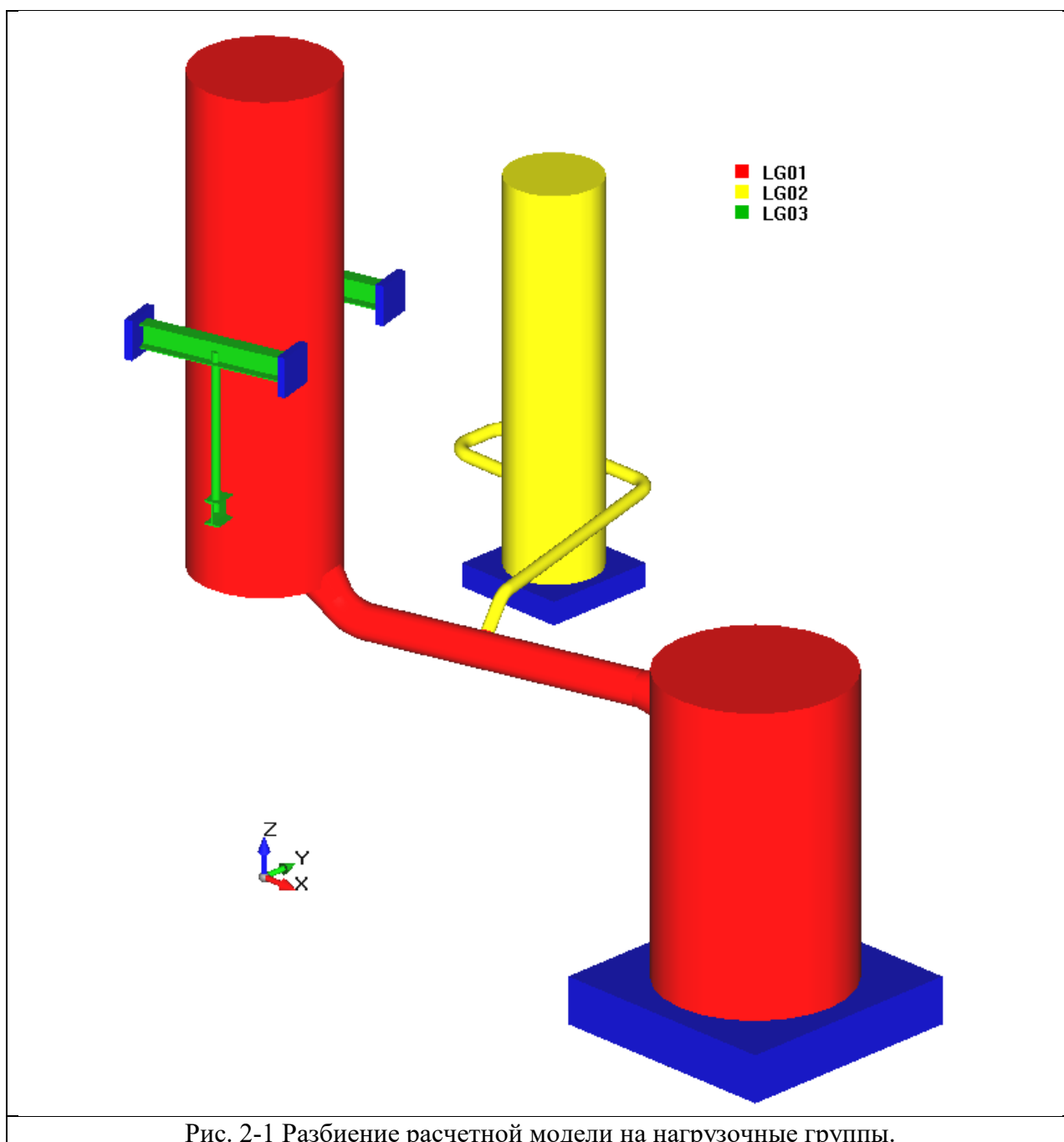
2 Режимы работы трубопровода

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

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

LG2 – трубопровод и оборудование, работающие с параметрами компенсатора объема

LG3 – строительные конструкции.



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.

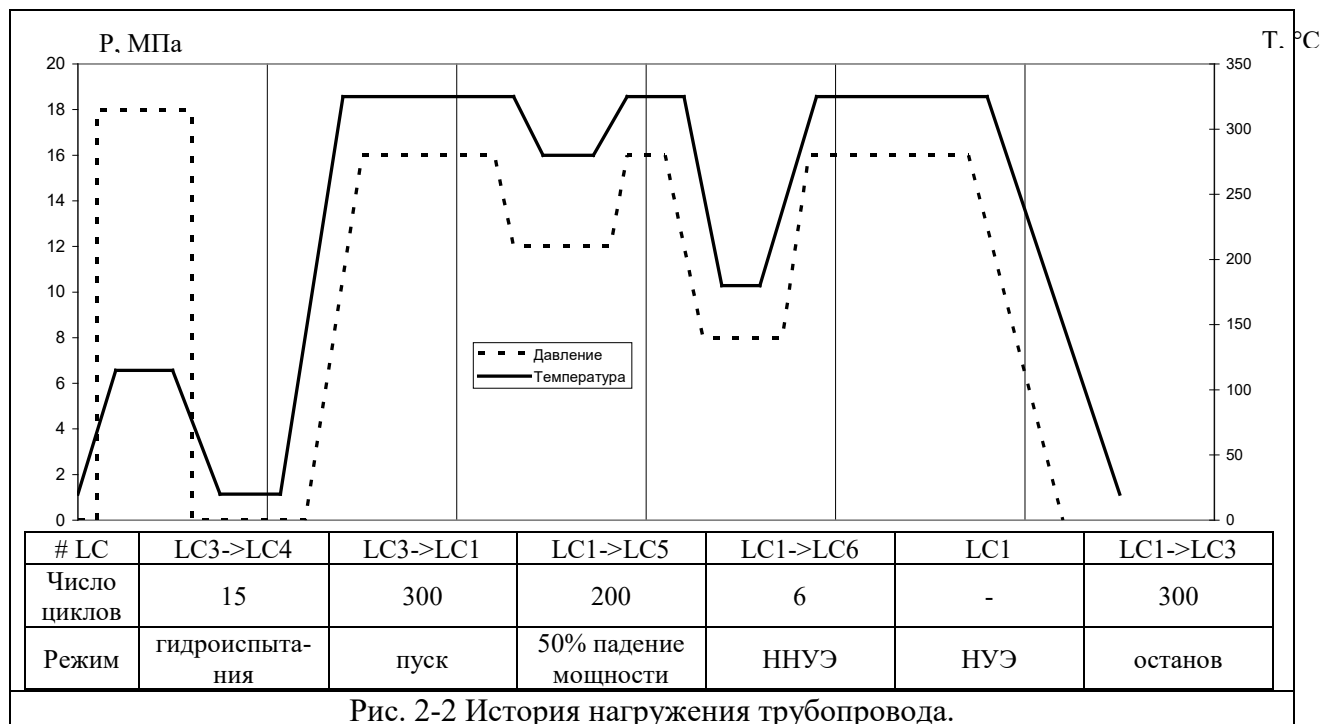
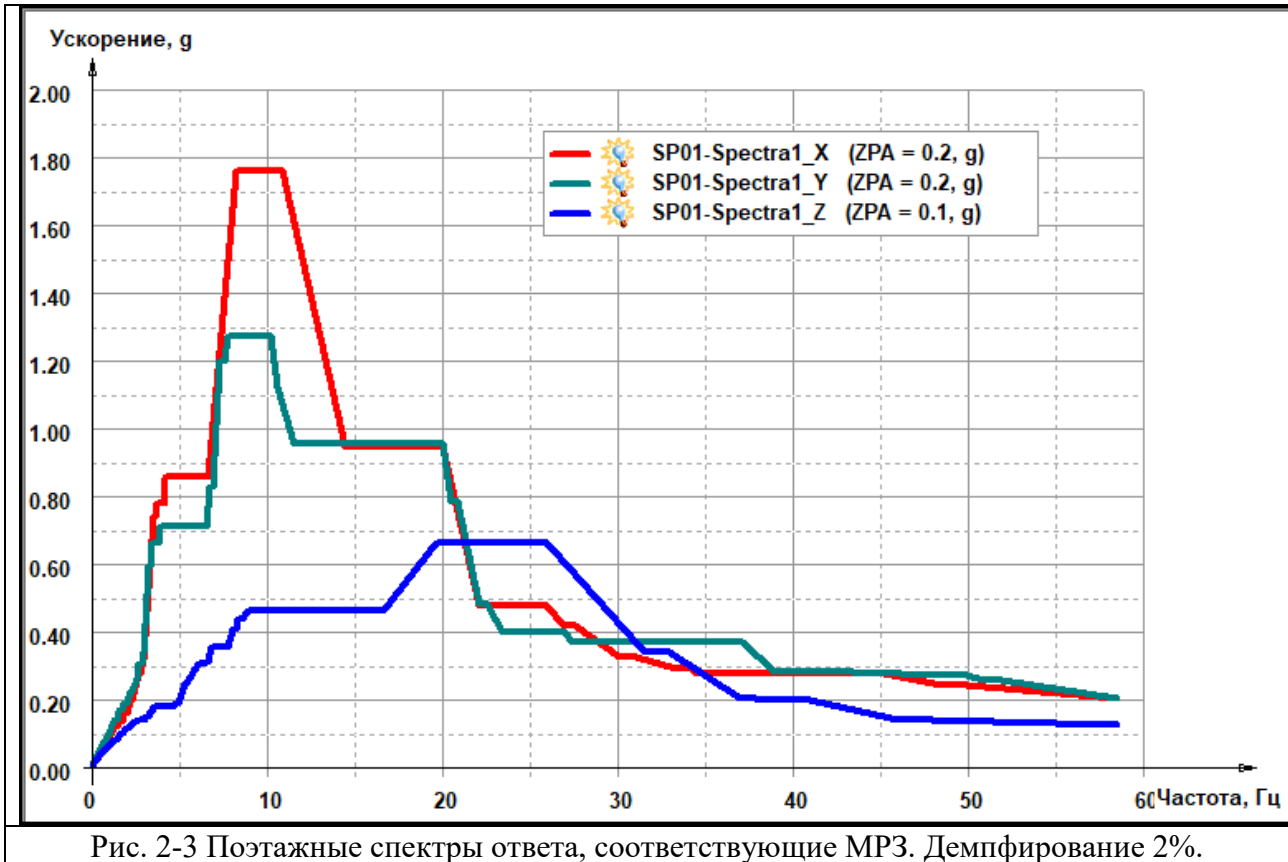


Табл. 2-1. Параметры режимов работы тестового трубопровода.

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

Помимо нагрузок, показанных на Рис. 2-2, предполагается, что за время эксплуатации трубопровод может быть подвержен одному землетрясению уровня МРЗ (SSE) и 5 землетрясениям уровня ПЗ (OBE). Каждое из рассматриваемых землетрясений характеризуется десятью эквивалентными циклами с максимальной амплитудой сейсмических напряжений. В соответствии с SRP 3.7.3, [7] такой набор землетрясений эквивалентен 20 циклам при МРЗ.

Поэтажные спектры ответа, соответствующие МРЗ приведены на Рис. 2-3. Предполагается, что землетрясение происходит во время нормальной эксплуатации трубопровода.



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
LC7	MODAL	NOL	-	землетрясение МРЗ

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 $T = T_a = 20^\circ C$, 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 = '$OPER', type = 'OPER_A', pend = 'YES', note = "Рабочее состояние" ; LC01
& LC mod = '$OPER', type = 'SUST_C', note = "Вес + давление" ; LC02
& LC mod = '$COLD', type = 'OPER_B', pend = 'YES', note = "Холодное состояние" ; LC03
& LC mod = 'HTEST', type = 'OPER_B', pend = 'YES', note = "Гидроиспытания" ; LC04
& LC mod = 'HTEST', type = 'SUST_C', note = "HTEST Вес + давление" ; LC05
& LC mod = 'POWER_50', type = 'OPER_B', pend = 'YES', note = "50% падение мощности" ; LC06
& LC mod = 'POWER_50', type = 'SUST_C', note = "POWER_50 Вес + давление" ; LC07
& LC mod = 'NNUE', type = 'OPER_B', pend = 'YES', note = "Нарушение НЭ" ; LC08
& LC mod = 'NNUE', type = 'SUST_C', note = "NNUE Вес + давление" ; LC09
& LC mod = '$OPER', type = 'MODAL', pend = 'NO', note = "MP3" ; LC10

DCASE
& LD type = 'RSM', lc = 'LC10', inp = 'SP01', mcom = 2, dk = 0.05, tt = 15, note = "SSE (MP3)" ; LD1

POST
& res = 'DISP', ls = "LC07", note = "Сейсм. перемещения" ; LS1
& res = 'S2_MRZ', ls = "LC02+LC07", note = "S2 (MP3)" ; LS2
& res = 'S2_NUE', ls = "LC02", note = "S2 (NUE)" ; LS3
& res = 'FORC', ls = "LC01-LC02", note = "TEMP_NUE" ; LS4
& res = 'FORC', ls = "LC04-LC05", note = "TEMP_HTEST" ; LS5
& res = 'FORC', ls = "LC08-LC09", note = "TEMP_NNUE" ; LS6
& res = 'FORC', ls = "LC06-LC07", note = "TEMP_POWER_50" ; LS7
```

Данные для задания постпроцессорного расчета накопленного повреждения 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 -> LC006	200	50% падение мощности
NC4	LC001 -> LC008	6	Нарушение НЭ
NC5	LC001 -> LC010	20	НЭ + сейсмика

В файле исходных данных приведенному набору вычислений соответствуют следующие команды:

```
FATG m_range = 'Yes',
& nc = 300, seq = "LC03, LC01", note = "HVЭ"
& nc = 15, seq = "LC03, LC04", note = "HTEST"
& nc = 200, seq = "LC01, LC06", note = "POWER_50"
& nc = 6, seq = "LC01, LC08", note = "NNUE"
& nc = 20, seq = "LC01, LC10", note = "SSE"
& load = 'LC10', mech = 'LC10',
& load = 'LC06', temp = 'LS7', mech = 'LC07',
& load = 'LC03', mech = 'LC03',
& load = 'LC08', temp = 'LS6', mech = 'LC09',
& load = 'LC04', temp = 'LS5', mech = 'LC05',
& load = 'LC01', temp = 'LS4', mech = 'LC02'
```

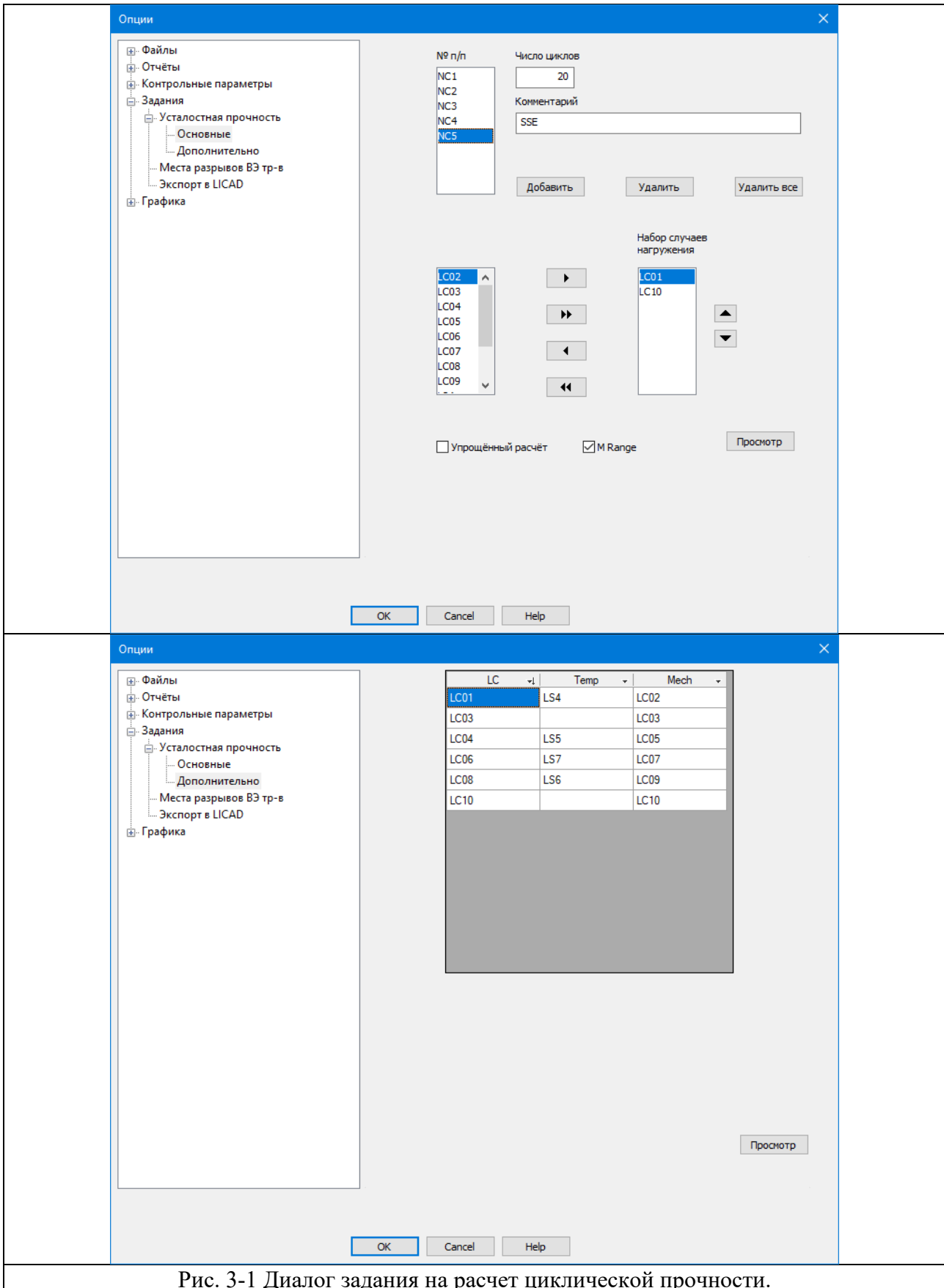


Рис. 3-1 Диалог задания на расчет циклической прочности.

4 Алгоритм расчета.

Процедура расчета накопленного повреждения 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	Ке	$(\sigma_a F)_k$, МПа	Доп. число циклов
1	LC3->LC1	713	1.385	346	1251
2	LC3->LC4	317	1	124	90316
3	LC3->LC6	593	1	206	7867
4	LC3->LC8	346	1	122	94995
5	LC3->LC10	140	1	114	130507
6	LC1->LC4	429	1	148	51927
7	LC1->LC6	120	1	44	1000000
8	LC1->LC8	367	1	128	81121
9	LC1->LC10	584	1	190	10016
10	LC4->LC6	374	1	148	52129
11	LC4->LC8	194	1	107	181340
12	LC4->LC10	183	1	62	1000000
13	LC6->LC8	246	1	85	1000000
14	LC6->LC10	525	1	188	10363
15	LC8->LC10	344	1	147	53238

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

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

	N	Примечание
LC1	526	300 (NC1) + 200 (NC3) + 6 (NC4)+20(NC5)
LC3	315	300 (NC1) + 15 (NC2)
LC4	15	15 (NC2)
LC6	200	200 (NC3)
LC8	6	6 (NC3)
LC10	20	20 (NC5)

3. Среди полученных результатов (Табл. 4-1) отыскивается максимум по $(\sigma_a F)_k$ и в соответствии с величиной этого напряжения из кривой усталости определяется допускаемое

число циклов $N_{доп}$, на основании чего определяется вклад сочетания "LC_i-LC_j" в накопленное повреждение:

$$UF_{i-j} = N_{i-j}/N_{доп},$$

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 накопленного повреждения в элементах трубопровода

Нагрузочные вектора	Начальное Число циклов	Последовательность расчетов:				
		1	2	3	4	5
LC1	526	315	20	15	6	170
LC3	315	315				
LC4	15			15		
LC6	200					170
LC8	6				6	
LC10	20		20			
Учтенное число циклов:		315 (LC3->LC1)	20 (LC1->LC10)	15 (LC1->LC4)	6 (LC1->LC8)	170 (LC1->LC6)

N	Сочетания нагрузок	(σ _a F) _к , МПа	Допустимое число циклов	Учитываемое число циклов	вклад в накопленную повреждаемость (UF)
1	LC3->LC1	346	1251	315	0.2518
2	LC3->LC4	124	90316		
3	LC3->LC6	206	7867		
4	LC3->LC8	122	94995		
5	LC3->LC10	114	130507		
6	LC1->LC4	148	51927	15	0.0003
7	LC1->LC6	44	1000000	170	0.0002
8	LC1->LC8	128	81121	6	0.0001
9	LC1->LC10	190	10016	20	0.0020
10	LC4->LC6	148	52129		
11	LC4->LC8	107	181340		
12	LC4->LC10	62	1000000		
13	LC6->LC8	85	1000000		
14	LC6->LC10	188	10363		
15	LC8->LC10	147	53238		
Суммарная накопленная повреждаемость (CUF):					0.2543

4. Суммарное накопленное повреждение 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)
-----
 элем.  узел1  узел2  Eq.  LC_i  LC_j  нач.  серед.  конец  допуск.  FS  UF  CUF
-----
...
BEND  1H15   1H20   Srk   3    1   608.99  676.74  713.03  565.42  1.26  !
      S'rk   1   10   487.19  550.80  584.32  598.00  0.98
      S''rk  3    4   147.75  147.59  147.55  640.60  0.23
      Afk   3    1   224.17  300.98  346.22  [LC003 - LC001] --> 0.251738  0.254267
...
-----
Максимальная накопленная повреждаемость: CUF = 0.254 (BEND 1H15 - 1H20)

```



Поля этой таблицы имеют следующие значения:

элем.	–	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 накопленное повреждение от сочетания нагрузок, указанных в квадратных скобках. В настоящем примере – это LC003 -> LC001
CUF	–	максимальное суммарное накопленное повреждение для всего элемента.

В конце таблицы печатается максимальное накопленное повреждение 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_{RK}) и (σ_{aF})_K, а также величины накопленного повреждения.

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 Ke 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"
7. Standard Review Plan, Section 3.7.3 "Seismic Subsystem Analysis Review Responsibilities", NUREG-0800, US NRC, Revision 4 - September 2013