

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ С ДЕФЕКТАМИ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ  
И ПРИНЦИПА ЛИНЕЙНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Рафиков С.К., Аллаяров У.Э.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

В работе [1,2,7] сформулирована концепция поверхности предельной повреждаемости материала при динамическом нагружении, которая может быть положена в основу мониторинга остаточного ресурса конструкций. В соответствии с этой концепцией изменение режимов нагружения конструкций в сторону их ужесточения и эксплуатационная наработка приводят к снижению уровня предельной поврежденности пластичного материала. Для полностью охрупченного материала этот уровень становится минимальным, соответственно и способность материала сопротивляться росту дефектов становится минимальной.

В работе [7] обобщены задачи накопления повреждаемости при циклических нагружениях нефтегазопроводов. Значительный научный и практический интерес представляют вопросы накопления повреждаемости при определении остаточного ресурса в таких технологических трубопроводах системах налива, обвязки резервуарных парков и работающих в условиях сложного режима нагружения.

На рис.1 показан график изменения давления в трубопроводе при стационарном режиме заполнения нефтепродуктом ж.д. цистерны. Производительность современных эстакад тактового налива светлых нефтепродуктов в железнодорожные цистерны составляет 1600 тонн нефтепродуктов в час, или 500 цистерн в сутки. При такой интенсивности очевидно возникновение динамического воздействия на трубопровод совмещенного с циклическим характером нагружения статическим давлением. Интенсивность этого воздействия растет с увеличением производительности и разности скачков давления налива, рис.2.

Очевидно, что любое изменение в истории нагружения конструкции приводит к изменению кинетики накопления повреждений в материале и их предельных значений [2]. Особую опасность для конструкций могут вызывать динамические перегрузки возникающие при нестационарных режимах в нефтепродуктопроводах, так как по мнению многих исследователей они существенно повышают склонность материалов к охрупчиванию и накоплению дефектов, вызывают динамические перегрузки которые оказывают существенное влияние на кинетику накопления повреждений.

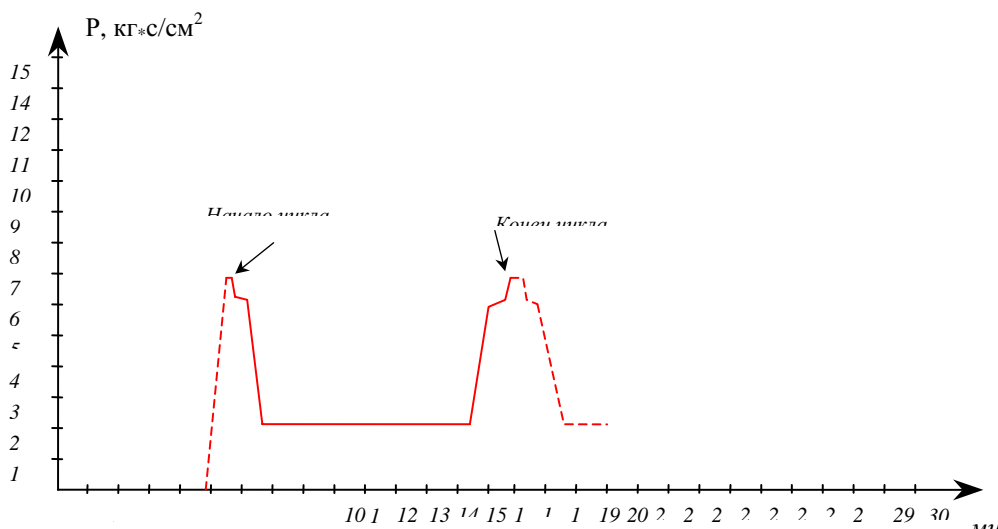


Рисунок 1. График изменения давления в трубопроводе при стационарном режиме налива

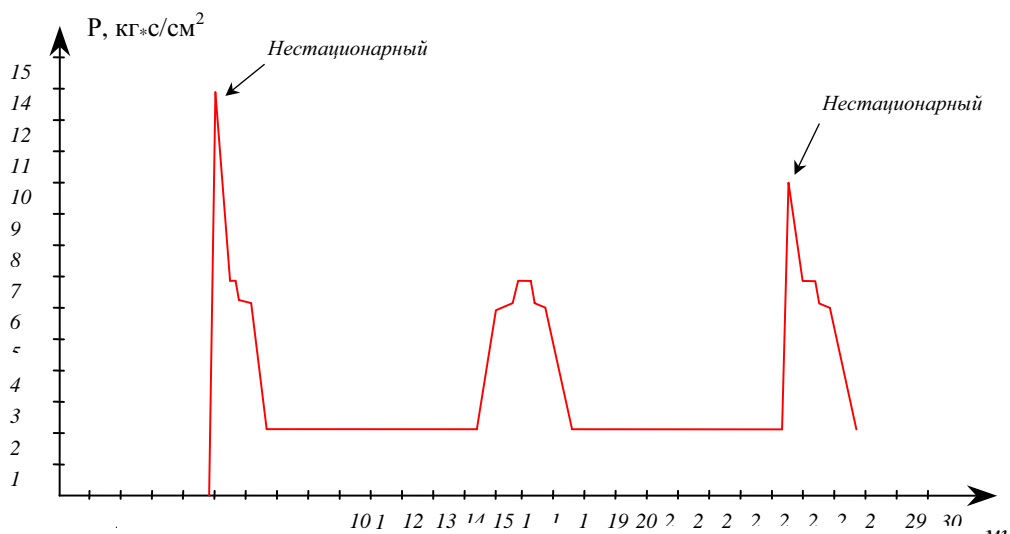


Рисунок 2. График изменения давления в трубопроводе при нестационарном режиме налива

Для оценки остаточного ресурса наливных нефтепродуктопроводов с дефектами стенок труб, работающих при циклическом нагружении, предлагается воспользоваться правилом линейного накопления повреждений [3], которое основано на следующих предположениях:

1. Воздействие циклических напряжений некоторой амплитуды приводит к усталостному повреждению нефтепродуктопроводов, величина которого определяется числом циклов воздействия напряжений этой амплитуды  $a_i$  в течение всего срока эксплуатации нефтепродуктопроводов, а также полным числом циклов до разрушения.

2. Воздействие в некоторой последовательности напряжений различной амплитуды приводит к накоплению повреждений, причем полная поврежденность равна сумме приращений поврежденностей, производимых воздействием напряжений каждой отдельной амплитуды  $a_i$ .

3. Когда полная накопленная поврежденность достигает некоторой критической величины, происходит усталостное разрушение нефтепродуктопроводов.

В случае, когда нефтепродуктопровод испытывает сложное нагружение ( $N_1$  циклов с рабочим давлением  $P_1$  и перепадом давлений  $\Delta P_1$ )— режим 1;  $N_2$  циклов с рабочим давлением  $P_2$  и перепадом  $\Delta P_2$  - режим 2; ...  $N_i$ ; циклов с рабочим давлением  $P_i$ , и перепадом  $\Delta P_i$  - режим  $i$ ), суммарное повреждение за один год определяется с использованием правила линейного накопления повреждений по формуле:

$$P_{\text{ГОД}} = \frac{N_1}{N_1^*} + \frac{N_2}{N_2^*} + \dots + \frac{N_i}{N_i^*}, \quad (1)$$

где  $N_1$  - число циклов нагружения при режиме 1 (с перепадом рабочего давления  $\Delta P_1$ ) за один год;

$N_1^*$ -число циклов, которое может выдержать до разрушения нефтепродуктопровод с дефектом при режиме 1, включающее оба этапа усталостного разрушения - этап зарождения и этап роста трещины;

$N_2$ -число циклов нагружения при режиме 2 (с перепадом рабочего давления  $\Delta P_2$ ) за один год;

$N_2^*$ -общее число циклов до разрушения, которое может выдержать нефтепровод с дефектом при режиме 2;

$N_i$  - число циклов нагружена при  $i$ -том режиме (с перепадом рабочего давления  $\Delta P$ ) за один год;

$N_i$ -общее число циклов до разрушения, которое может выдержать нефтепродуктопровод с дефектом при  $i$ -том режиме.

Уровень накопленных повреждений  $\Pi$  за все время эксплуатации определяется как сумма ежегодных повреждении нефтепродуктопровода в течение всего срока эксплуатации по формуле:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i \quad (2)$$

Остаточный ресурс определяется как  $R = 1 - \Pi$ .

Числа циклов нагружения нефтепродуктопровода перепадами рабочего давления  $N_1, N_2 \dots N_i$  при различных режимах определяются следующим образом:

1. Выбираются данные об интенсивности суточных колебаний рабочего давления нефтепродуктопровода за каждый день календарного года в течение 2-3 лет, при которых наблюдалась наибольшая нестабильность в работе, т.е. большее число остановок и пусков, максимальная загруженность нефтепродуктопровода, наибольшее значение максимальных давлений в нефтепродуктопровода.

2. Строятся осциллограммы изменения рабочего давления в нефтепродуктопроводе за каждый год, и определяется общее число циклов нагружения в каждом году.

3. Выполняется приведение несимметричного процесса нагружения нефтепродуктопровода к эквивалентному отнулевому. Для этого процесс нагружения нефтепродуктопровода рабочим давлением представляется как блоковый. С помощью компьютерной программы перепады рабочих давлений классифицируются в соответствии со следующим алгоритмом:

- определяются перепады внутренних давлений для рассматриваемого процесса нагружения и выбираются наибольший и наименьший из них ( $\Delta P_{\max}$  и  $\Delta P_{\min}$ );

- определяется длина интервала возможных значений перепады

$$(d_n = \Delta P_{\max} - \Delta P_{\min});$$

- интервал возможных значений перепадов делится на 10 (к примеру) классов; выбор количества классов не имеет принципиального значения, поскольку количество классов в программе определяется как «const» и может быть изменено в любой момент;

- подсчитываются частоты попадания перепадов внутренних давлений в соответствующие классы за контрольный период (в данном случае, за год); а приведение перепадов циклов давлений к эквивалентному отнулевому виду производится по соотношению [4,5,6]:

$$\Delta P = \Delta P_{\max} - k_{no} \cdot P_{\min}, \quad (3)$$

где,  $k_{no}$  - уровень оптимизма.

При различных значениях уровня оптимизма ( $k_{no}$ ) получают различные оценки эквивалентного процесса нагружения: от крайне пессимистичной ( $k_{no}=0$ ) до крайне оптимистичной ( $k_{no} = 1$ ). Реалистической позиции соответствует промежуточное значение коэффициента приведения  $k_{no}=\{0;1\}$ .

В результате использования данной компьютерной программы получаются блок-диаграммы частот попадания перепадов рабочих давлений в соответствующие классы (с 1 по 10) за каждый рассматриваемый год при различных уровнях оптимизма ( $k_{no} = 0; 0,5; 1$ ). Классы с 1 по 10 соответствуют десяти режимам нагружения нефтепродуктопровода перепадами рабочих давлений: 1 класс - режим № 1, при котором нефтепровод нагружается перепадом рабочих давлений  $\Delta P_1$  с частотой нагружения в год  $n_1$  и т.д. Пример блок-диаграмм приведен на рис. 2.

4. По диаграммам определяются частоты попадания размахов рабочих давлений в соответствующие классы (с 1 по 10) за каждый год при различных уровнях оптимизма ( $k_{no} = 0; 0,5; 1$ ). Частоты на диаграммах выражены в относительных единицах от общего числа циклов нагружения в год. Результаты анализа блок-диаграмм частот нагружения представляются в таблицах.

5. По частотам попадания перепадов рабочих давлений в соответствующие классы (с 1 по 10), определяемым по блок-диаграммам, определяются искомые числа циклов нагружения нефтепродуктопровода

перепадами рабочего давления  $N_1, - N_{10}$  за каждый год при десяти различных режимах, соответствующих десяти классам, взятым из блоковых диаграмм.

Можно предположить, что в длительно действующих нефтепродуктопроводах, помимо острых трещиноподобных дефектов, имеется множество дефектов нетрещиноподобных, в которых за такой период вполне могло произойти накопление повреждений структуры металла. Поэтому достаточно актуальной является задача оценки остаточного ресурса нефтепродуктопровода с нетрещиноподобными, «гладкими» дефектами стенок (вмятинами, потерями металла и т.д.).

Общее число циклов нагружения, необходимых для разрушения, складывается из числа циклов, необходимых для зарождения дефекта  $N_z$  и числа циклов, необходимого для развития дефекта до критических размеров  $N_p$ . Число циклов  $N^*$  нагружения нефтепродуктопровода с нетрещиноподобным концентратором напряжений необходимое для зарождения дефекта, определяется из уравнения Коффина-Мэнсона, адаптированного для несимметричных форм нагружения.

При мягком режиме нагружения, адаптированном для несимметричного нагружения [7]:

$$N^* = \chi_2 \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{1 - \psi_B}}{\tilde{\epsilon}_a - \frac{\sigma_{-1}}{E}}} \quad (4)$$

где  $\tilde{\epsilon}_a$  - амплитуда истинных деформаций в дефекте для эквивалентного симметричного нагружения, определяется по диаграмме истинных напряжений - деформаций растяжения  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ ;

$\psi_B$  - относительное сужение площади сечения образца, соответствующее пределу прочности  $\sigma_B$ , определяемое по ГОСТ 1497-73;

$E$  - модуль упругости стали;

$\sigma_{-1}$  - предел усталости стали. Для сталей, применяемых в нефтепроводах,  $\sigma_{-1} = 0,4\sigma_B$ .

$\chi_2$  - показатель мягкого циклического нагружения.

Число циклов нагружения для развития зародившегося дефекта определяется решением уравнения Периса для линейной стадии развития трещиноподобных дефектов [5]:

$$\frac{dl}{dn} = C_{\sigma} * K_1^{m_6} \quad (6)$$

где  $C_{\sigma}$  - коэффициент, зависящий от относительного сужения образца при его разрыве;  $K_1$ -коэффициент интенсивности напряжения; $m_6$ - коэффициент зависящий от относительного изгиба образца.

Расчет ресурса ведется с позиции крайнего пессимизма, т.е. во внимание принимается наименьшее значение остаточного ресурса как наихудший вариант развития событий для нефтепродуктопровода.

### Литература

1. Лебедев А. А., Чаусов И. Г., Богданович А. З. Оценка предельных повреждений в материалах при статическом нагружении с учетом вида напряженного состояния // Пробл. Прочности - 2002. № 2. С. 35-40.
2. Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ядерных энергетических установок / Ф. М. Митенков, Г. Ф. Городов, Ю. Г. Коротких, В. А. Панов. С.Н. Пичков // Пробл. машиностроения и надежности машин. -2002. № 2 С. 106-112.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание,предотвращение. Пер. с англ. - М: Мир, 1984. - 624 с.
4. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных воздействиях. - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
5. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом нагружении. - М.: Наука, 1979.
6. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977.- 232 с.,
7. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М., Гумеров Р.С., Азметов Х.А. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта / Под ред. А.Г. Гумерова - М.: «Недра-Бизнесцентр», 1998.- 252 с.