МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

·ВНИИСТ·

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО РАСЧЕТУ КОНСТРУКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ИХ СООРУЖЕНИИ

Р 426-81

ВНИИСТ

МОСКВА 1983

УДК 621.643-192(083.75)

"Рекомендации по расчету конструктивной надежности линейной части магистральных трубопроводов при их сооружении" разработаны в развитие "Руководства по инженерной оценке и прогнозированию фактической конструктивной надежности магистральных трубопроводов". Р 301-77 (М., ВНИИСТ, 1978) и посвящены вопросам прогнозной оценки начальной конструктивной надежности линейной части магистральных трубопроводов при проектировании и сооружении.

В Рекомендациях разработаны: система показателей надежности и эффективности магистральных трубопроводов; способы оценки этих показателей; принципы оценки конструктивной надежности линейной части трубопроводов и ее элементов; принципы определения характеристик статистически изменчивых факторов, участвующих в оценке начальной надежности. Расчеты начальной надежности увязаны с общей задачей прогнозирования эффективности нефтегазопроводов.

Рекомендации предназначены для использования научно-исследовательскими, проектными и производственными организациями отрасли, решающими вопросы обеспечения надежности сооружаемых магистральных трубопроводов.

Цель работы - ввести расчеты конструктивной надежности в практику проектирования и сооружения магистральных трубопроводов.

Использование Рекомендаций предполагает знакомство специалистов с основами теории надежности, теории вероятностей и математической статистики.

Рекомендации разработаны в лаборатории надежности конструкций трубопроводов кандидатами техн.наук В.Д.Шапиро и В.В.Рождественским при участии ст.инж. Л.Г.Холстовой; инженеров В.И.Васильева и С.Ю.Батадиной. Математическое обеспечение (программирование и расчеты на ЭВМ) выполнено руководителем группы лаборатории математических методов исследований Г.А.Шацкой. Разд.4.4 разработан при участии сотрудников отдела сварки трубопроводов инж. И.А.Дубова и канд. техн.наук Н.П.Сбарской.

Замечания и предложения направлять по адресу: 105058, Москва, Окружной проезд, 19, ВНИИСТ, лаборатория надежности конструкций трубопроводов (ЛНК).

ВНИИСТ	Рекомендации по расчету конструктивной надежности линейной части магистральных трубопроводов при их сооружении	Р 426-81

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Под надежностью линейной части магистрального трубопровода понимается ее свойство сохранять и восстанавливать максимальную расчетную пропускную способность при соответствующих расчетных параметрах и заданном режиме перекачки.

Если исключить из рассмотрения технологические причины возможного снижения пропускной способности, например, такие, как отложения парафина на внутренних стенках трубы, образование гидратных пробок и др., то надежность линейной части будет полностью характеризоваться уровнем надежности ее конструкций, иначе, - надежностью магистрального трубопровода как вида сооружения (конструктивной надежностью).

I.2. Конструктивная надежность линейной части магистрального трубопровода - это свойство конструкции трубопровода сопротивляться нагрузкам и воздействиям, определяемым расчетными условиями его функционирования без отказов и достижения предельных состояний,указанных в технической документации по эксплуатации системы.

I.3. Отказы на линейной части магистрального трубопровода представляют большую опасность, поскольку связаны не только с недоотпуском транспортируемого продукта потребителям,но и с безвозвратными потерями нефти и газа, ущербом окружающей среде. Вместе с тем методы расчетного прогнозирования отказов, оценки и учета показателей конструктивной надежности линейной части трубопроводов при их проектировании, строительст-

Внесены ВНИИСТом лабораторией надежности конструкции трубопроводов	Утверждены ВНИИСТом 22 июля 1981 г.	Срок введения 1 марта 1983г.

ве и эксплуатации по существу только начинают развиваться. Достаточно отметить тот факт, что при рассмотрении вопросов надежности нефте- и газоснабжения, проектировании оптимальных нефте- и газотранспортных систем показателями конструктивной надежности линейной части трубопроводов задаются произвольно, на основании лишь некоторых весьма обобщенных сведений об отказах. При этом совершенно не учитываются специфические особенности конкретного трубопровода: механические свойства материала и качество труб, условия и качество сооружения трубопровода, параметры и режимы предпусковых испытаний и эксплуатации, конструкция трубопровода. Между тем именно эти особенности и определяют процесс формирования того фактического уровня надежности линейной части, который в дальнейшем самым непосредственным образом должен влиять на решение всех важнейших технологических вопросов - от выбора схемы резервирования до расчета аварийных запасов топлива. Отсутствие хотя бы ориентировочных расчетов показателей конструктивной надежности линейной части в ряде случаев приводило к сооружению недостаточно надежных трубопроводов, что обусловливало невозможность их эксплуатации на проектные давления, необходимость сооружения дополнительных ниток и как следствие - снижение эффективности трубопроводных систем. Отсутствие методов расчета показателей конструктивной надежности не позволяет объективно оценивать достоинства и недостатки конкурирующих вариантов технических решений трубопроводов, выбирать из них наиболее эффективные.

1.4. Уровень конструктивной надежности, приобретаемый линейным участком трубопровода к началу эксплуатации, называется начальным уровнем конструктивной надежности. Необходимость самостоятельного исследования и оценки начальной надежности объясняется важностью этапа формирования надежности для дальнейшей безаварийной эксплуатации трубопровода. Создание методики прогнозирования начального уровня конструктивной надежности по информации о свойствах исходных материалов для строительства трубопровода, параметрах качества сооружения трубопроводов дает возможность путем нормирования этого уровня разработать принципиально новый путь к обоснованию и уточнению требований к исходным материалам и конструкциям, параметрам качества, строительным допускам и критериям допустимой дефектности при выполнении сварочно-монтажных работ. Это в конечном счете позволит перейти к принципу сооружения трубопроводов заданного уровня надежности. Настоящий документ посвящен комплексному исследованию основных этапов формирования начального уровня конструктивной надежности и расчетной оценке этого уровня.

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ (ТИПА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ) И ИХ ОЦЕНКА

2.1. Основные показатели надежности при работе объектов до первого отказа

2.1.1. Вероятность безотказной работы $P(t)$, или функция надежности, характеризует вероятность того, что в пределах заданного интервала времени работы объекта (здесь - трубопровода) отказ не произойдет. Если заданный интервал времени (наработка) составляет τ, то указанная вероятность того, что отказ не произойдет до момента t, будет измеряться неравенством

$$P(t) = P(\tau \geq t). \qquad (1)$$

2.1.2. Обратное (в вероятностном смысле) неравенство

$$F(t) = P(\tau < t) = 1 - P(t) \qquad (2)$$

выражает вероятность отказа $F(t)$.

2.1.3. Начальная вероятность безотказной работы (начальная надежность) P_0 характеризует вероятность того, что при вступлении объекта (трубопровода) в эксплуатацию отказ не произойдет, т.е. вероятность того, что наработка будет больше нуля

$$P_0 = P(\tau > 0). \qquad (3)$$

2.I.4. Обратное (в вероятностном смысле) соотношение

$$F_0 = P(\tau = 0) = 1 - P_0 \qquad (4)$$

выражает начальную вероятность отказа.

2.I.5. Оценки вероятности безотказной работы и начальной вероятности безотказной работы (начальную надежность) применительно к трубопроводам можно вычислять как для элемента,так и для линейного участка, а также для линейной части в целом. Оценка вероятности безотказной работы (или вероятности отказа), в том числе и начальной, является основополагающей задачей надежности линейной части нефтегазопроводов. Знание оценок вероятности безотказной работы элементов линейной части трубопроводных систем и их начальной надежности дает возможность вычислять все необходимые при решении практических задач показатели как конструктивной надежности, так и эффективности этих систем.

2.I.6. Интенсивность отказа $\lambda(t)$ (иначе, по [I] интенсивность отказов) – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Иначе – это вероятность отказа элемента, безотказно проработавшего до момента t, за последующую малую единицу времени. Интенсивность отказа вычисляется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \qquad (5)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности отказа в момент t, физический смысл которой – вероятность первого отказа в достаточно малую единицу времени, а математический смысл – производная функции надежности (с обратным знаком) по времени:

$$f(t) = P'(t) = F'(t). \qquad (6)$$

2.2. Оценка надежности системы с последовательным соединением элементов при ее работе до первого отказа

2.2.I. В настоящих Рекомендациях (разд.3) в качестве математической модели для расчета надежности линейной части трубопровода будет использоваться представление о системах из последовательно соединенных (в общем случае - зависимых) элементов. Считается, что n элементов в системе соединены последовательно, если отказ любого элемента вызывает отказ всей системы.

2.2.2. Если рассматривать работу такой системы до первого ее отказа, надежность системы полностью определяется функцией надежности $P_c(t)$, т.е. вероятностью безотказной работы системы за время t. Вероятность безотказной работы (функция надежности) системы с независимыми элементами при последовательном соединении элементов выражается через функции надежности элементов по формуле

$$P_c(t) = P_1(t)\,P_2(t)\ldots P_n(t), \tag{7}$$

где $P_c(t)$ - функция надежности (вероятность безотказной работы) системы;

$P_1(t), P_2(t)\ldots P_n(t)$ - функции надежности (вероятности безотказной работы) элементов системы.

2.2.3. При последовательном соединении элементов их интенсивности отказа складываются:

$$\lambda_c(t) = \lambda_1(t) + \cdots + \lambda_n(t), \tag{8}$$

где $\lambda_1(t), \ldots, \lambda_n(t)$ - интенсивности отказа элементов.

2.2.4. В случае, когда элементы системы имеют одинаковую надежность, т.е. когда

$$P_1(t) = P_2(t) = \cdots = P_n(t) = P(t),$$

надежность системы определяется по формуле

$$P_c(t) = [P(t)]^n, \tag{9}$$

где n - количество элементов в системе,

а интенсивность отказа системы рассчитывается по формуле

$$\lambda_c(t) = n\,\lambda(t), \tag{10}$$

где $\lambda(t)$ - интенсивность отказа элемента.

2.2.5. Вероятность отказа системы $F_c(t)$ с последовательным соединением элементов выражается соотношением

$$F_C(t) = 1 - P_C(t) = 1 - P_1(t)P_2(t)\ldots P_n(t) = \\ = 1 - [1 - F_1(t)][1 - F_2(t)]\ldots[1 - F_n(t)], \qquad (11)$$

где $F_1(t), F_2(t), \ldots, F_n(t)$ – вероятности отказа элементов системы.

В теории надежности распространена более простая приближенная формула для вычисления вероятности отказа такой системы

$$F_C(t) \approx F_1(t) + F_2(t) + \ldots + F_n(t), \qquad (11a)$$

погрешность которой не превосходит [2] величины

$$\frac{1}{2}[F_1(t) + \ldots + F_n(t)]^2. \qquad (12)$$

2.2.6. В случае, когда элементы системы имеют одинаковую надежность, формула (11a) приобретает вид

$$F_C(t) \approx nF(t), \qquad (13)$$

где $F(t)$ – вероятность отказа элементов системы.

Погрешность вычисления по формуле (13) не превосходит величины

$$\frac{1}{2}[nF(t)]^2. \qquad (14)$$

2.2.7. В сложной системе, состоящей из последовательно соединенных элементов, какой является, например, линейная часть магистрального трубопровода, всегда имеются группы одинаковых элементов. Если они работают примерно в одинаковых условиях, надежности элементов внутри каждой группы равны. Для этого случая функция надежности и интенсивности отказа (имеется в виду первый отказ) системы определяются по формулам

$$P_C(t) = [P_1(t)]^{n_1}[P_2(t)]^{n_2}\ldots[P_S(t)]^{n_S}; \qquad (15)$$

$$\lambda_C(t) = n_1\lambda_1(t) + \ldots + n_S\lambda_S(t), \qquad (16)$$

где $P_1(t), \ldots, P_S(t)$ – функции надежности элементов I-й,... S -й групп;

$n_1, \ldots, n_S$ – число элементов в I-й,... S -й группах;

$\lambda_1(t), \ldots, \lambda_S(t)$ – интенсивности отказа элементов I-й,. S -й групп.

2.2.8. Вероятность отказа такой системы приближенно оценивается по формуле

$$F_C(t) \approx n_1 F_1(t) + n_2 F_2(t) + \ldots + n_S F_S(t) = \sum_{i=1}^{S} n_i F_i(t), \quad (I7)$$

где $F_1(t), F_2(t), \ldots, F_S(t)$ – вероятности отказа элементов I-й, ..., S -й групп;

i, S – номер группы и число групп одинаковых элементов.

2.2.9. При условии экспоненциальности законов распределения надежности элементов вероятность отказа системы с последовательным соединением элементов при ее работе до первого отказа (например, для случая наличия в системе групп идентичных элементов) оценивается по формуле

$$F_C(t) = \sum_{i=1}^{S} n_i F_i(t) = \sum_{i=1}^{S} n_i (1 - e^{-\lambda_i t}), \quad (I8)$$

а приближенно, при малом t (т.е. в начале эксплуатации системы) – по формуле

$$F_C(t) \approx \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i t, \quad (I8a)$$

где

λ_i – интенсивность отказов элементов i – й группы;

i, S – номер группы и число групп одинаковых элементов.

В формуле (I8a), помимо приближения (I4), участвует приближение $F_i(t) \approx \lambda_i t$, составляющее при малом t величину

$$\frac{1}{2}(t\lambda)^2. \quad (I9)$$

2.2.10. В системах с независимыми элементами все элементы отказывают независимо друг от друга, т.е. отказ одних элементов не изменяет надежности других элементов. В реальных последовательно соединенных системах, таких, как нефтегазо - проводы, многие элементы являются зависимыми (более подробно этот вопрос освещен в главе 3). В простейшем случае, если система состоит из двух одинаковых последовательно соединенных зависимых элементов, вероятность безотказной работы каждого из которых составляет $P(t)$, безотказность такой системы $P_C(t)$ оценивается [3] по формуле

$$P_C(t) = [P(t)]^2 + \psi[P(t)][1-P(t)], \qquad (20)$$

где ψ - коэффициент корреляции между отказами элементов.

Если система состоит из n одинаковых по надежности элементов, ее вероятность безотказной работы можно оценить последовательным применением формулы (20).

2.2.II. Для приближенной оценки вероятности безотказной работы системы из последовательно соединенных зависимых элементов можно пользоваться формулами (7), (9), (I5), поскольку, как доказано в теории надежности, эти формулы дают заниженную, т.е. безопасную "пессимистическую" оценку надежности.

2.2.I2. Линейная часть магистрального трубопровода представляет собой восстанавливаемую систему, на которой объективно существует возможность неоднократных отказов. С увеличением времени эксплуатации системы вероятность первого отказа $F_C(t)$ этой системы становится равной единице, а функция надежности - нулю. В связи с этим в качестве основных показателей восстанавливаемой системы используются показатели, характеризующие поток отказов: функция восстановления, параметр потока отказов, коэффициент готовности.

2.2.I3. Ниже определяются показатели надежности восстанавливаемых систем в процессе их длительного функционирования, т.е. с учетом потока отказов и восстановлений.

2.3. Основные показатели надежности объекта с учетом потока отказов и восстановлений

2.3.I. Функционирование магистрального трубопровода представляет собой непрерывный процесс чередования случайных от - резков времени работы и простоя системы, разделяющихся моментами отказов (или преднамеренных остановок системы) и восстановлений. При этом время каждого простоя (восстановления) в среднем не является пренебрежимо малым в сравнении с интервалами работы системы. Такой процесс в теории надежности носит название процесса восстановления с конечным временем восстановления.

2.3.2. Функция восстановления $H(t)$ характеризует среднее количество отказов восстанавливаемого объекта до момента времени t

$$H(t) = \overline{\nu(t)}, \tag{21}$$

где $\overline{\nu(t)}$ – математическое ожидание (среднее значение) случайной величины $\nu(t)$ – числа отказов, происшедших за время t.

Функцию восстановления можно вычислять как для восстанавливаемых элементов, так и для восстанавливаемых систем. Это основная характеристика процесса функционирования любого восстанавливаемого объекта.

2.3.3. На начальном участке времени функционирования восстанавливаемого элемента, когда $F(t) \ll 1$, справедливо приближенное равенство

$$H(t) \approx F(t), \tag{22}$$

относительная погрешность которого не превосходит величины

$$\frac{F(t)}{1-F(t)}, \tag{23}$$

где $F(t)$ – вероятность отказа восстанавливаемого элемента.

2.3.4. Параметр потока отказов $\omega(t)$ – это безусловная плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени. Иначе – это вероятность отказа восстанавливаемого объекта за малый промежуток времени после момента t безотносительно к тому, отказывал ли объект до этого момента или нет. Математический смысл параметра потока отказов - производная функции восстановления по времени

$$\omega(t)=H'(t). \tag{24}$$

2.3.5. Если нелинейностью функции восстановления в пределах периода времени t возможно пренебречь, то можно характеризовать среднее количество отказов объекта, происшедших в единицу времени, постоянным в пределах этого отрезка времени параметром потока отказов $\omega_{cp}(t)$, вычисляемым по формуле

$$\omega_{cp}(t)\approx\frac{H(t)}{t}=\omega=const. \tag{25}$$

Это соотношение является строгим только в случае экспоненциального распределения функции надежности элементов в системе, когда процесс восстановления образует пуассоновский (простейший) поток отказов.

2.3.6. Для пуассоновского потока как простейшего условная λ и безусловная ω плотности вероятности возникновения отказа совпадают, т.е.

$$\omega=\lambda, \tag{26}$$

где λ - интенсивность пуассоновского потока отказов;
ω - параметр пуассоновского потока отказов.

2.3.7. Для линейной части магистрального трубопровода, рассматриваемой как единый протяженный (без деления на элементы) объект, параметр потока отказов в случае использования приближенного соотношения (25) приводится еще и к длине рассматриваемого участка трубопровода:

$$\omega=\frac{H(t)}{Lt}, \tag{27}$$

поэтому размерность параметра потока отказов в этом случае такова:

$$\frac{\text{отказов}}{\text{в год на 1000 км}}.$$

2.3.8. Коэффициент готовности $K_г$ – это основной комплексный показатель надежности. Он оценивает вероятность (иначе относительную долю времени) нахождения объекта (например, участок линейной части трубопровода) в работоспособном состоянии и определяется по формуле

$$K_г = \frac{T_1}{T_1 + T_0} \qquad (28)$$

или через параметр потока отказов

$$K_г = 1 - \omega(t) T_0 , \qquad (29)$$

где

T_1 – средняя наработка объекта (например, линейного участка) на отказ;

T_0 – среднее время восстановления объекта.

2.3.9. В случае обобщенного представления параметра потока отказов по формуле (27) для линейного участка магистрального трубопровода длиной $\mathcal{L}$ (тыс.км) коэффициент готовности $K_г$ при $\omega(t) = \omega = \lambda \approx const$ (т.е. пуассоновском характере процесса восстановления) вычисляется по формуле

$$K_г = 1 - \omega \mathcal{L} T_0 \approx 1 - \lambda \mathcal{L} T_0 , \qquad (30)$$

где $\mathcal{L}$ – длина участка линейной части, тыс.км;

T_0 – среднее время восстановления работоспособности линейной части после отказа.

2.3.10. Статистическая трактовка коэффициента готовности восстанавливаемого объекта связана с показателем его остаточного времени жизни. Показатель остаточного времени жизни ξ_t восстанавливаемого объекта – это случайная величина, характеризующая время, оставшееся функционирующему объекту до первого отказа справа (на оси времени). Вероятность работоспособного состояния такого объекта обозначается

$$P\{\xi_t > 0\} \qquad (31)$$

и означает вероятность того, что восстанавливаемый объект попадает (на оси времени) на участок работоспособности, т.е. вероятность того, что объект будет исправен. Статистическая трактовка такой вероятности: если точку случайным образом бросить на ось времени t , где отмечены участки работоспособности и отказов объекта, то указанная вероятность означает, что точка попадет на участок работоспособности. Эта вероятность и называется коэффициентом готовности, т.е.

$$K_{Г} = P\{\xi_t > 0\}. \tag{32}$$

2.3.II. Точным смысловым аналогом начального коэффициента готовности, т.е. коэффициента готовности в первый период эксплуатации объекта (при его работе до первого отказа), является показатель начальной надежности, которая, как уже указывалось выше (п.2.I.3), показывает вероятность того, что наработка объекта будет больше нуля. Учитывая, что при работе до первого отказа наработка объекта по смыслу тождественна остаточному времени жизни, трактовка начальной надежности совпадает с трактовкой коэффициента готовности (п.2.3.IO) начального периода работы объекта, т.е.

$$K_{Г}^{нач} = P\{\xi_t^{нач} > 0\} = P(\tau > 0) = P_0 = 1 - F_0. \tag{32a}$$

2.4. <u>Оценка надежности системы последовательно соединенных элементов с учетом возможности неоднократных отказов</u>

2.4.I. Моменты отказов элементов системы, отложенные на общей оси времени, образуют поток отказов этой системы, являющийся суммой n процессов восстановления элементов. Случайное число отказов системы $\nu_c(t)$ до момента t составляет

$$\nu_c(t) = \nu_1(t) + \nu_2(t) + \ldots + \nu_n(t), \tag{33}$$

где $\nu_1(t), \ldots, \nu_n(t)$ - число отказов элементов системы.

2.4.2. Среднее число отказов (функция восстановления) системы до момента t будет соответственно составлять

$$H_c(t) = H_1(t) + H_2(t) + \ldots + H_n(t), \tag{34}$$

где $H_1(t), \ldots, H_n(t)$ – функция восстановления элементов.

Для систем, состоящих из i групп равнонадежных элементов

$$H_c(t) = \sum_{i=1}^{s} n_i H_i(t),$$

где n_i и $H_i(t)$ – соответственно число элементов и функция восстановления(вероятность отказа) элемента i -й группы.

2.4.3. Так же, как для восстанавливаемого элемента, для системы параметр потока отказов имеет смысл производной функции восстановления системы по времени

$$\omega_c(t) = H_c'(t). \tag{35}$$

2.4.4. Точные формулы для вычисления показателей надежности восстанавливаемых систем $H_c(t)$, $\omega_c(t)$, K_r получить весьма сложно, поэтому для оценки этих показателей целесообразно пользоваться простыми приближенными соотношениями. В данной работе, посвященной оценке начального уровня надежности, нас интересует случай малых значений t. Так как для элемента системы на начальном участке времени, когда $F(t) \ll 1$, справедливо приближенное соотношение (22), аналогичное приближенное равенство будет справедливо и для систем из равнонадежных элементов [2]:

$$H_c(t) \approx F_c(t) \approx n\,F(t), \tag{36}$$

учитывая соотношения (IIa) и (34),

где $F_c(t) \approx nF(t)$ – вероятность отказа (учитывая малое значение t первого отказа) системы;

$F(t)$ – вероятность отказа элемента системы;

n – число элементов в системе.

Относительная погрешность соотношения (36) не превосходит значения

$$\frac{F(t)}{1 - F(t)}. \tag{37}$$

В теории надежности показано, что приближенное равенство (36) для систем, состоящих из большого числа элементов, соблюдается не только на начальном отрезке времени работы системы, но и на любом этапе ее эксплуатации , так как безотносительно ко времени "вклад" отдельных элементов больших систем в общее число отказов системы ничтожно мал.

2.4.5. Учитывая (36) и (34), функция восстановления системы, состоящей из групп элементов примерно одинаковой надежности, должна приближенно вычисляться по формуле

$$H_C(t) \approx \sum_{i=1}^{S} n_i F_i(t), \qquad (38)$$

где $F_i(t)$ – вероятность отказа элемента i -й группы;

n_i – число элементов в i -й группе;

i, S – номер группы и число групп однотипных элементов примерно одинаковой надежности.

2.4.6. В теории надежности доказана теорема о том, что сумма большого числа независимых потоков будет примерно пуассоновским потоком с переменным параметром, равным параметру потока отказов. Главное условие этой теоремы состоит в том, что интенсивность каждого из слагаемых потоков должна быть мала по отношению к интенсивности суммарного потока, что для систем типа линейного участка трубопровода соблюдается. Опираясь на эту теорему, будем в дальнейшем считать поток отказов линейной части трубопровода пуассоновским с переменным параметром $\omega(t)$.

2.4.7. В настоящих Рекомендациях, учитывая пуассоновский характер потока отказов, принято, что суммарный параметр потока отказов системы (линейного участка трубопровода) является постоянным во времени и лишь дважды претерпевает скачкообразное изменение – по окончании периодов приработки и нормальной эксплуатации.

Учитывая принятое допущение, процесс функционирования системы будем характеризовать следующими значениями параметра потока отказов:

начальным, характерным для периода приработки:

$$\omega_{нач} \approx \frac{H(t)_{нач}}{t_{нач}} = const;$$

срединным, характерным для периода нормальной эксплуатации:

$$\omega_{cp} \approx \frac{H(t)_{cp}}{t_{cp}} = const;$$

конечным, характерным для периода старения системы:

$$\omega_{к} \approx \frac{H(t)_{к}}{t_{к}} = const.$$

2.4.8. Таким образом, надежность системы (участка линейной части) в начале эксплуатации будем характеризовать простейшим (пуассоновским) потоком отказов с постоянным параметром ω, принимающим некоторое начальное значение $\omega_{нач}$. Учитывая справедливость для пуассоновского потока равенства (26) и допущение о постоянстве ω на начальный период функционирования системы, имеем для периода приработки системы

$$\omega_c = \lambda_c = const. \qquad (39)$$

2.4.9. Для интенсивности отказов системы из последовательных элементов в начале эксплуатации (т.е. при работе системы до I-го отказа) справедливы формулы (8), (I0), (I6). Поэтому начальное значение параметра потока отказов системы может быть определено для такой системы через постоянные интенсивности отказов элементов по формулам:

в случае, когда элементы системы имеют разную надежность,

$$\omega_{нач} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \qquad (40)$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов;

n – количество элементов;

в случае, когда элементы имеют одинаковую надежность,

$$\omega_{нач} = n\lambda, \qquad (40а)$$

где λ – интенсивность отказов элементов, имеющих одинаковую надежность;

в случае, когда система состоит из ряда групп элементов, надежность которых внутри групп одинакова,

$$\omega_{нач} = n_1\lambda_1 + n_2\lambda_2 + \ldots + n_s\lambda_s = \sum_{i=1}^{s} n_i \lambda_i, \qquad (40б)$$

где $\lambda_1, \ldots, \lambda_s$ – интенсивности отказа элементов в I-й,..., S – й группах;

$n_1, \ldots, n_s$ – число элементов в I-й,..., S -й группах;

i, S – номер группы и число групп одинаковых элементов.

Умножая обе части равенства (40б) на t (продолжительность периода приработки системы), получим с использованием (I8a)

$$\omega_{нач} t = t \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i = \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i t, \qquad (4I)$$

т.е., учитывая (I8a), приходим к приближенному равенству (38).

2.4.I0. Условие (4I) соответствует приближенной (для малых значений t) оценке вероятности отказа последовательной системы из групп примерно одинаковых по надежности однотипных элементов при экспоненциальном законе их распределения (I8a). Таким образом, экспоненциальность законов распределения элементов и справедливость формул (I8), (I8a) оценки вероятности отказа системы (для восстанавливаемой системы – первого отказа) следует из допущения о пуассоновском характере потока отказов системы.

2.4.II. Учитывая (4I), для начального этапа эксплуатации системы из групп последовательно соединенных однотипных элементов получим одно и то же выражение для вычисления вероятности отказа и функции восстановления системы (I8a), т.е.

$$H_c(t) \approx F_c(t) \approx \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i t = t \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i, \qquad (42)$$

а для функции надежности (вероятности безотказной работы системы до момента t) в начальный период ее эксплуатации:

$$P_c(t) \approx 1 - F_c(t) = 1 - t \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i, \qquad (42a)$$

где i, S – номер группы и число групп однотипных элементов;

n_i – число элементов в i -й группе;

λ_i – интенсивности отказа элементов i -й группы.

П р и м е ч а н и е. Так как поток отказов рассматриваемой системы – пуассоновский, в соотношениях (42),(42а) можно было бы λ_i заменить на ω_i, однако, правильнее оставить λ_i из следующих соображений. Сложная система из последовательно соединенных элементов всегда составляется из высоконадежных элементов, поскольку иначе такая система будет часто отказывать. Такие элементы по существу являются элементами, работающими до 1-го отказа, поскольку их долговечность должна быть намного выше экономически целесообразных "сроков жизни" самой системы. Поэтому для элементов указанной системы целесообразно оперировать с интенсивностью отказа, а не с параметром потока отказов.

2.4.12. Принимая во внимание пуассоновский характер потока отказов, параметр потока отказов ω_c описываемой системы в начальный период ее эксплуатации согласно (40) следует вычислять как сумму

$$\omega_c^{нач} = \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i . \tag{43}$$

2.4.13. Коэффициент готовности для восстанавливаемой системы из последовательных элементов вычисляется на основе формулы (28), (29). Начальный коэффициент готовности системы (т.е. линейного участка длиной L в тыс.км), характеризующий готовность системы, состоящей из ряда групп последовательно соединенных элементов, в первый период эксплуатации,т.е. начальную надежность, будем вычислять по формуле

$$K_г^{нач} = P_{0(c)} = 1 - \omega_c T_0 = 1 - T_0 \sum_{i=1}^{S} n_i \lambda_i = 1 - \sum_{i=1}^{S} n_i (1 - K_{г_i}), \tag{44}$$

где n_i, λ_i – соответственно число элементов и интенсивность отказов элементов i -й группы в период приработки;

i, S – номер группы и число групп примерно одинаковых по надежности (однотипных) элементов;

T_0 – среднее время восстановления системы (линейного участка) после отказа;

$K_{г_i}$ – коэффициент готовности элемента i -й группы.

Из формулы (44) следует, что при наличии информации о начальной надежности элементов системы коэффициент готовности начального периода эксплуатации системы из групп последовательно соединенных элементов (типа линейного участка однониточного магистрального трубопровода) целесообразно вычислять через начальные вероятности отказов элементов

$$K_r^{нач} = 1 - F_{0(c)} = 1 - \sum_{i=1}^{s} n_i (1 - K_{r_i}) = 1 - \sum_{i=1}^{s} n_i F_{0(i)}, \quad (44а)$$

где $F_{0(i)} = (1 - K_r^{нач})$ – начальная вероятность отказа элемента i-и группы по формуле(32а).

2.4.14. Важным и сложным вопросом является аналитическая вероятностная оценка начальных коэффициентов готовности (иначе – оценка показателей начальной надежности) элементов линейной части, т.е. оценка, опирающаяся на теорию предельных состояний (а не на статистику отказов) и использующая информацию об исходных материалах, параметрах сооружения и нагрузках на трубопроводы. Этому вопросу посвящен разд.4 настоящих Рекомендаций.

3. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

3.1. Методология оценки надежности магистральных трубопроводов как уникальных (индивидуальных) объектов

3.1.1. Магистральные трубопроводы как объекты исследования надежности относятся к уникальным объектам, создаваемым в единственном экземпляре. Как и серийно выпускаемые, уникальные объекты обладают вполне определенными показателями надежности, требующими прогноза при проектировании, обеспечения при строительстве, контроля и поддержания этих показателей при эксплуатации.

3.1.2. Для разработки методов прогнозирования показателей конструктивной надежности нефтегазопроводов как уникальных сооружений имеются вполне определенные основания:

производственными организациями накоплен достаточный опыт сооружения трубопроводов высокой надежности, поэтому есть представление о том, каким уровнем безотказности обладают лучшие из современных действующих магистралей;

существует эталон для сравнения (по уровню надежности) магистральных трубопроводов и других ответственных сооружений: считается, что достаточно высоким уровнем надежности обладает несущая конструкция, имеющая к концу срока эксплуатации вероятность безотказной работы (вероятность неразрушения) $P(t) \geq 0{,}9986$, поэтому при сооружении нефтегазопроводов следует с учетом сроков их "жизни" до I-го отказа стремиться к обеспечению фактического уровня вероятности неразрушения ответственных элементов трубопровода не ниже указанного;

широко внедрены методы неразрушающего контроля, позволяющие выявлять скрытые дефекты еще до эксплуатации и предоставляющие материал для расчетного прогнозирования надежности;

накоплен опыт расследования причин отказов, а также опыт сбора, обработки и анализа информации об отказах, качестве строительства, применяемых материалах, режимах эксплуатации;

развиваются методы физической теории прочности, позволяющие в ряде случаев прогнозировать наступление отказов;

внедряются методы технической диагностики, позволяющие прогнозировать состояние объекта, проводить мероприятия по устранению причин, способных привести к отказам.

3.I.3. Прогнозирование надежности индивидуальных (уникальных) объектов - наименее разработанная область в теории надежности. Это объясняется в первую очередь кажущейся противоречивостью понятия "надежности индивидуального (уникального) объекта". Существо затруднений в этом вопросе состоит в следующем.

3.I.4. Для массовых однотипных изделий надежность оценивается непосредственно по результатам испытаний группы (серии) этих изделий или же на основании наблюдений за работой серии изделий в эксплуатации. При этом оценка надежности, вычисленная "прямым" методом, т.е. на основании испытания или эксплуатации серии однотипных изделий, является общей характеристикой всей совокупности этих изделий и не является характеристикой какого-либо конкретного изделия этой совокупности. Это следует из теории множеств, с помощью которой определяются все количественные вероятностные показатели надежности. В соответствии с теорией множеств элементы множества неразличимы, а это означает, что по информации о множестве нельзя составить никакого представления о конкретном элементе этого множества. Характеристики надежности каждого конкретного изделия анализируемой совокупности могут сильно отличаться от характеристик, установленных для серии в целом. Поэтому вычисленные для какой-либо серии изделий характеристики надежности нельзя переносить на какое-либо конкретное изделие этой серии. Например, нельзя говорить, опираясь на расчетные характеристики надежности серии, о гарантированной наработке конкретных изделий этой серии на отказ: для каждого конкретного изделия наработка на отказ может быть и меньше и больше вычисленной для всей серии.

3.1.5. Эта особенность оценки надежности как характеристики, относящейся к некоторому множеству, хорошо всем известна и воспринимается без всяких возражений, когда надежность оценивается путем исследования серии однотипных объектов. Когда же объект существует в единственном экземпляре, возникает вопрос, какой смысл следует вкладывать в понятие "оценка надежности такого одиночного объекта".

3.1.6. Для индивидуальных (уникальных) объектов оценка надежности, как правило, осуществляется путем расчетного прогнозирования. Смысл оценки надежности остается тем же, что и для массовых изделий, хотя на первый взгляд кажется, что оценка надежности индивидуального объекта, будучи вычисленной, должна относиться только к этому объекту. Оценка надежности индивидуального объекта носит, как и для массовых изделий, вероятностный характер и производится с использованием теории множеств. Различие состоит лишь в том, что в основе оценки надежности индивидуального объекта лежит не осреднение числа отказавших при испытании изделий, а некоторые другие соображения, например, решение уравнений, построенных на принципе причинности отказа. При этом подходе фактические испытания (или эксплуатация) серии изделий заменяются "проигрыванием" этих процессов на расчетной стохастической модели, в которой событие фактического отказа отождествляется с событием нарушения условий предельных состояний, а множество испытываемых объектов заменяется множеством возможных состояний индивидуального объекта. Если же уникальный объект по характеру своего применения восстанавливаемый, оценка его надежности возможна и путем осреднения наработок за некоторый период эксплуатации. Однако методами теории множеств, которая и здесь является основой оценки надежности, предсказать невозможно, в каком из состояний будет находиться уникальный объект в конкретный момент времени. Оценка надежности в принципе для этого не предназначена - она, как и для массовых изделий, в данном случае является обобщенной характеристикой воображаемого множества подобных индивидуальных объектов.

3.I.7. Для количественной оценки надежности линейной части нефте- и газотранспортных систем применимы оба указанных выше метода:

косвенное расчетное прогнозирование показателей надежности по исходной информации о применяемых материалах, нагрузках, параметрах качества сооружения;

прямое прогнозирование надежности по информации об отказах трубопровода как восстанавливаемого объекта. Ценную дополнительную информацию о начальной надежности трубопровода предоставляют предэксплуатационные приемо-сдаточные испытания.

3.I.8. Следует еще раз подчеркнуть, что найденная оценка надежности линейного участка трубопровода как уникального объекта в сущности не принадлежит этому конкретному объекту, поскольку определение показателей надежности косвенным (расчетным) методом, так же, как и прямым, производится методами теории множеств. Например, если установлено, что надежность (вероятность безотказной работы) к моменту времени t линейного участка трубопровода составляет $P(t) = 0{,}95$, это только означает, что данный линейный участок принадлежит к условному множеству идентичных, одинаково нагруженных линейных участков, 95% которых к моменту t будут работоспособны, а 5% откажут.

3.I.9. Несмотря на условность таких показателей, информационная ценность оценок надежности уникальных, как и массовых объектов, очень высока: она обобщает все имеющиеся сведения о свойствах объекта и условиях его функционирования, служит интегральной характеристикой объекта, отражающей многие индивидуальные особенности его поведения во времени. Поэтому не забывая об условности вероятностного оценивания, можно нормировать оценку конструктивной надежности трубопроводных систем, распределение ее по элементам, используя в строительстве трубопроводов в качестве основного критерия качества сооружения, обеспечения высокой начальной надежности.

3.2. Математическая модель расчета эффективности и функциональной надежности трубопроводных систем

3.2.I. Под газотранспортной системой здесь понимается: одно- или многониточный магистральный газопровод, включающий в себя следующие элементы (все или частично):

установки по подготовке газа к транспорту;

компрессорные станции;

линейную часть газопровода (с лупингами и отводами);

газораспределительные станции.

Аналогично определяются и системы, предназначенные для транспорта нефти.

3.2.2. К магистральным трубопроводам предъявляются два основных требования:

обеспечение высокой эффективности их работы;

обеспечение требуемой безопасности их эксплуатации.

Оба эти важнейших требования, предъявляемые к нефте- и газопроводным системам, непосредственно связаны с надежностью их конструкций и удовлетворяются тем полнее, чем более высокими показателями конструктивной надежности обладают трубопроводы.

3.2.3. Основным показателем качества функционирования любой технической системы производственного назначения является общий (или суммарный) технический эффект (Ф) от ее применения. Суммарный технический эффект (Ф) от эксплуатации системы измеряется (рис.I) произведением ее технической эффективности (E) на срок службы этой системы (T):

$$\Phi = E\,T. \tag{45}$$

3.2.4. Прекращение эксплуатации сложной восстанавливаемой системы обусловливается экономической нецелесообразностью ее дальнейшего применения из-за резкого возрастания затрат на техническое обслуживание и ремонт, связанных с физическим старением и износом системы. Поэтому под сроком службы системы Т при оценке суммарного технического эффекта Ф подразумевается ее долговечность. Как будет показано ниже, техническая эффективность системы Е, обладающей определенными техническими параметрами, определяется безотказностью элементов этой системы. Таким образом, суммарный технический эффект от эксплуатации сложной технической системы непосредственно зависит от степени надежности этой системы, т.е. от ее долговечности и безотказности составляющих элементов.

3.2.5. Прогрессивные технические и технологические мероприятия, осуществляемые при проектировании и создании технических систем, оказывают влияние либо на долговечность, либо на безотказность, либо на оба эти свойства надежности системы, приводя к повышению общего технического эффекта от применения этой системы. На рис.I показан механизм воздействия различных мероприятий, внедряемых в строительство магистральных трубопроводов, на суммарный технический эффект посредством воздействия на конструктивную надежность (безотказность и долговечность) трубопроводных систем.

3.2.6. Оставляя в стороне анализ составляющей Т общего эффекта Ф в формуле (45), т.е. анализ долговечности конструкций трубопровода, рассмотрим вопрос о содержании составляющей технической эффективности Е трубопроводных систем в увязке с безотказностью конструкций трубопроводов.

3.2.7. Эффективность по [4] - это та выгода, польза, которую получает потребитель от эксплуатации системы. В качестве критерия технической эффективности[x)] газопроводов должна рассматриваться производительность Q или, что равнозначно, пропускная способность q газопровода [24]:

$$E = Q,\ \text{млн.м}^3 \tag{46}$$

или

$$E = q = \frac{Q}{365\,K_{год}}\ \frac{\text{млн.м}^3}{\text{сут}}, \tag{47}$$

где $K_{год}$ - коэффициент, учитывающий сезонную неравномерность потребления газа.

---

x) Вопросы экономической эффективности здесь не рассматриваются.

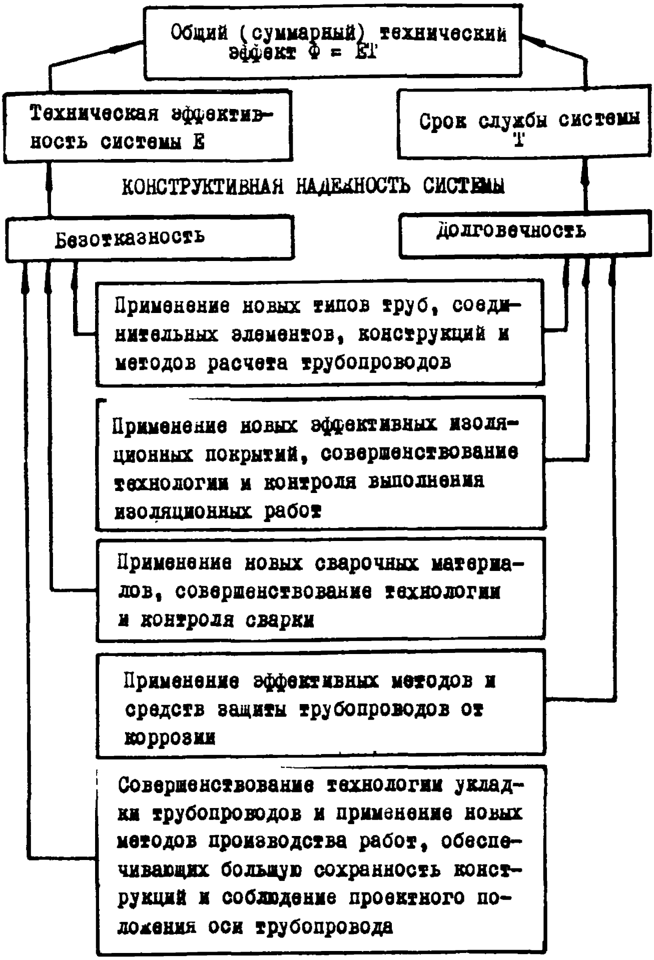

Рис.I. Механизм воздействия различных мероприятий, внедряемых в строительство трубопроводов, на суммарный технический эффект

Аналогично определяется понятие эффективности нефтепровода.

3.2.8. Эффективность как понятие разложимо на две составляющие - неслучайную и случайную:

$$E = K_{эф} \ E_0 , \qquad (48)$$

где E_0 - неслучайная составляющая - номинальная эффективность, определяемая технологическим расчетом проектируемого трубопровода при условии, что на нем не будет отказов, т.е. при условии работоспособности всех его элементов (линейной части, КС или НС);

$K_{эф}$ - случайная составляющая - коэффициент сохранения эффективности, показывающий, какая часть номинальной эффективности трубопровода сохраняется при его реальной работе, т.е. с учетом возможных отказов.

3.2.9. Совокупность исправных и отказавших элементов трубопроводной системы определяет ее состояние в каждый момент времени. Последовательность состояний образует траекторию системы в пространстве состояний. Поскольку функционирование системы зависит от многих случайных факторов, эффект от эксплуатации системы тоже имеет случайную природу. Поэтому показатели эффективности обычно являются усредненными величинами, а расчеты производятся теми или иными методами осреднения.

3.2.10. Наиболее общим методом оценки коэффициента эффективности системы является осреднение по траекториям, однако он является чрезвычайно громоздким и трудоемким. Значительно более простым и удобным является метод осреднения по состояниям, который можно использовать для трубопроводных систем по следующей причине. Трубопроводные системы относятся к высоконадежным системам, которые проектируются таким образом, что с учетом структурного резервирования за время своей работы сохраняют начальное состояние с вероятностью, близкой к единице. При этом, составляя схему расчета надежности трубопроводной системы, необходимо максимально укрупнять элементы схемы, включая в них целые совокупности деталей, узлов и агрегатов, например, рассматривая как элементы: компрессорные станции в целом, участки линейной части, заключенные между этими станциями и т.д. (рис.2). В этом случае трубопроводную систему при оценке ее начальной эффективности можно отождествить с системами кратковременного действия [5], для которых справедливо осреднение по состояниям. В данном методе траектории элементов системы во времени принимаются за горизонтальные линии, каждая из которых соответствует пребыванию элемента от начала и до конца работы в одном и том же состоянии. Следовательно, при данном методе отбрасываются траектории, отражающие переходы элемента из состояния в состояние, что занижает результат. Однако при указанной укрупненной разбивке на элементы ошибка будет незначительной, поскольку вероятности таких переходов для укрупненных элементов, особенно в начальный период времени эксплуатации, малы.

3.2.11. Следует отметить, что коэффициент сохранения эффективности, вычисленный осреднением по состояниям, будет отражать эффективность системы, в которой еще нет явных признаков старения, когда отказы становятся весьма частыми и эффективность падает. Поэтому при расчете $K_{эф}$ методом осреднения по состояниям следует указывать, что он не распространяется на период старения трубопроводной системы (т.е. справедлив до 8–10-летнего возраста трубопроводов).

3.2.12. Коэффициент сохранения эффективности определяется как математическое ожидание (среднее значение) случайной величины относительной производительности или пропускной способности из условия

$$K_{эф} = \sum_i W_i h_i = \frac{1}{E_0} \sum_i E_i h_i, \tag{49}$$

где h_i – вероятность того, что система (трубопровод) окажется в i-м состоянии к началу работы и далее останется в нем;

$W_i = \frac{E_i}{E_0} = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{q_i}{q_p}$ – относительная эффективность системы в i-м состоянии;

$E_i = Q_i$ (или q_i) – эффективность системы в i-м состоянии;

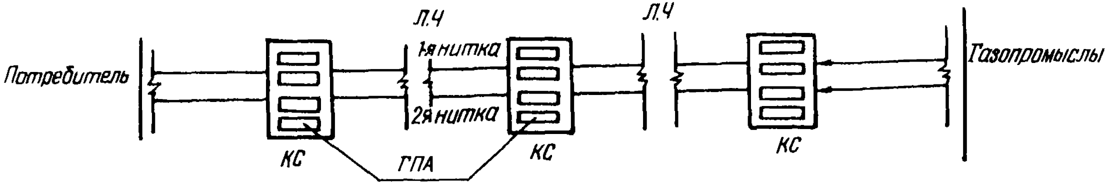

Рис.2. Структурная схема двухниточной газопроводной системы при расчете ее технической эффективности и функциональной надежности: л.ч. – участок линейной части между компрессорными станциями

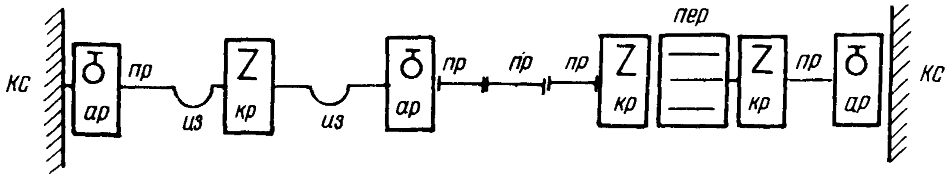

Рис.3. Модель (структурная схема конструктивной надежности) линейной части однониточного трубопровода (между двумя КС) как системы из последовательно соединенных элементов:

пр-прямолинейный элемент (участок); из- упруго-изогнутый элемент (участок); кр-криволинейный элемент; ар-элемент линейной арматуры; пер-переход через препятствия или $\left.\begin{matrix} E_0 = Q_0 \\ E_0 = q_p \end{matrix}\right\}$ – номинальная (расчетная) эффективность системы.

3.2.13. Вероятности состояний системы вычисляются с помощью коэффициентов готовности элементов системы как произведение коэффициентов готовности элементов, являющихся в данном состоянии работоспособными, и всех коэффициентов "неготовности" элементов, являющихся в данном состоянии неработоспособными (отказавшими):

$$h_i = K_{г1} K_{г2} \dots K_{гк} (1 - K_{г(к+1)})(1 - K_{г(к+2)}) \dots (1 - K_{гм}), \quad (50)$$

где $K_{г1}, \dots, K_{гк}, \dots, K_{гм}$ – коэффициенты готовности элементов системы;

$(1 - K_{г(к+1)}), \dots, (1 - K_{гм})$ – коэффициенты "неготовности" элементов системы.

3.2.14. В формуле (50) h_i (вероятность i -го состояния системы) одновременно имеет смысл коэффициента готовности системы в i -м состоянии [5].

3.2.15. Учитывая, что в начальный период эксплуатации (при работе системы до первого отказа) коэффициенты готовности вырождаются в показатели начальной надежности (32), соотношение (50) для начального периода работы системы можно записать в виде

$$h_i = P_{01} P_{02} \dots P_{0к} (1 - P_{0(к+1)})(1 - P_{0(к+2)}) \dots (1 - P_{0м}), \quad (50а)$$

где $P_{01}, \dots, P_{0к}, \dots, P_{0м}$ – начальные надежности элементов системы;

$(1 - P_{0(к+1)}), \dots, (1 - P_{0м})$ – начальные вероятности отказа элементов системы.

Очевидно, что в формулах (50), (50а) любые из коэффициентов готовности и показателей начальной надежности одних и тех же элементов для начального периода эксплуатации совпадают.

3.2.16. Предшествующее проекту технико-экономическое обоснование на проектирование системы должно содержать требование к плановой производительности $Q_{пл}$ магистрального трубопровода, т.е. к его плановой эффективности $E_{пл}$, поэтому номинальный уровень эффективности, на который должен ориентироваться техноло гический расчет трубопровода без аварийного резерва, т.е. номинальная производительность Q_0, или, что равнозначно, номинальная (расчетная) пропускная способность q_p, определяется исходя из формулы (48)

$$E_0 = \frac{E_{пл}}{K_{эф}}, \tag{51}$$

иначе

$$Q_0 = \frac{Q_{пл}}{K_{эф}} \tag{51а}$$

или

$$q_p = \frac{Q_{пл}}{365 K_{год} K_{эф}}, \tag{51б}$$

если для проектируемой системы установлено значение коэффициента сохранения эффективности $K_{эф}$.

Примечание. Если при проектировании трубопровода предусматривается создание аварийного резерва и трубопровод проектируется непосредственно на плановую производительность $Q_{пл}$, в этом случае, зная коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$, легко определить объем аварийной недоподачи, следовательно, аварийный резерв $Q_{рез}$ в течение календарного года по формуле

$$Q_{рез} = Q_{пл}(1 - K_{эф}). \tag{52}$$

3.2.17. Как в формулах (51-51б), так и в формуле (52), присутствует коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$. Учитывая, что значение этого коэффициента определяется через коэффициенты готовности элементов проектируемой системы, ключом к обеспечению требуемой (плановой) эффективности является знание коэффициентов готовности элементов трубопроводной системы - линейной части и компрессорных станций, причем в начальный период эксплуатации эти коэффициенты готовности тождественны по смыслу показателям начальной надежности (начальной вероятности безотказной работы P_0, т.е. вероятности $P_0 = P(\tau > 0)$.

3.2.18. Следует отметить, что для линейной части однониточного трубопровода роль коэффициента сохранения эффективности $K_{эф}^{однтр}$ играет сам коэффициент готовности линейной части $K_г$:

$$K_{эф}^{одн\ тр} = K_г, \qquad (53)$$

а в начальный период эксплуатации системы – начальный коэффициент готовности $K_г^{нач}$, иначе – показатель начальной надежности P_0 :

$$K_{эф}^{одн\ тр} = K_г^{нач} = P_0 .$$

3.2.19. В технологических расчетах трубопроводов широко используется понятие функциональной надежности (или просто надежности), под которой подразумевается способность нефте- или газопроводной системы бесперебойно (в течение рассматриваемого периода) подавать потребителям нефть или газ при допустимом уровне давлений в количествах, обусловленных структурой нефте- или газопотребления. Функциональная надежность системы выражается в способности ее к непрерывной подаче нефти или газа не ниже заранее установленной величины пропускной способности при допущении возможности аварии какого-либо (каких-либо) из ее элементов. Количественно функциональная надежность нефте- или газотранспортной системы характеризуется приведенной в [6] вероятностью

$$P\,(q \geq q_p)_{t \in \tau} , \qquad (54)$$

определяющей вероятность того, что фактическая пропускная способность системы q к моменту t, принадлежащему заданному интервалу времени τ, будет не менее расчетной пропускной способности q_p, соответствующей плановой производительности трубопровода.

3.2.20. Пользуясь понятием эффективности, функциональную надежность нефте- или газотранспортной системы можно короче охарактеризовать как способность к сохранению в течение определенного времени плановой эффективности.

3.2.21. Оценка функциональной надежности системы, понимаемая как доля времени ее работы с производительностью $q \geq q_p$, может быть определена при нахождении коэффициента сохранения эффективности системы суммированием вероятностей состояний, при которых $q \geq q_p$, т.е.

$$P(q \geq q_p)\Big/_{t \in \tau} = \sum_{\mathcal{F} \in \mathcal{V}} h_j , \qquad (55)$$

где h_j – вероятность состояния системы, при котором $q > q_p$,
$\mathcal{F}$ – подмножество состояний, при которых $q \geq q_p$, выделенное из множества $\mathcal{V}$ состояний системы.

3.2.22. Для сложных технических систем, к каким относится большинство нефте- и газопроводных систем, оценка надежности утрачивает свой истинный смысл, поскольку теряет смысл само понятие "отказа" такой системы в целом. Учитывая обязательное наличие структурного и других видов резервирования, отказы элементов такой системы никогда не приводят к отказам (в общепринятом смысле этого слова) самой системы, а лишь вызывают некоторое снижение ее эффективности, поэтому невыполнение условия $q \geq q_p$ для сложной системы лишь формально можно называть ее отказом – система при этом продолжает работать, обладая пониженной эффективностью. По существу условие (55) для сложных систем является не условием оценки надежности, а условием оценки вероятности сохранения эффективности на должном уровне. Для сложных нефте- и газопроводных систем показатель функциональной надежности $P(q > q_{(p)})$ (55) является более частной характеристикой их эффективности в сравнении с $К_{эф}$, а значит и менее значимой с точки зрения проектирования. Поэтому оценивать надежность целесообразно на уровне элементов трубопроводных систем (линейной части, компрессорных, насосных станций), т.е. конструктивную надежность, переходя для систем в целом к оценкам эффективности через коэффициенты готовности элементов.

3.2.23. Для расчета коэффициента сохранения эффективности системы следует разбить все множество состояний системы ι^c на два подмножества (на два уровня): подмножество $\mathcal{F}$ эффективных состояний с уровнем эффективности $E \geq E_{кр}$ (где $E_{кр}$ – критический уровень эффективности) и подмножество $\mathcal{E}$ состояний с пренебрежимо малой или нулевой эффективностью системы, т.е. с уровнем $E < E_{кр}$. Уровень эффективности системы, разделяющий эти подмножества, т.е. уровень $E_{кр}$, является до некоторой степени условным и должен задаваться из экономических соображений и соображений достижения плановой производительности, заданной на стадии разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) на проектирование системы. Этот критический уровень, называемый иначе γ -процентным уровнем эффективности, вычисляется по формуле

$$E_{кр} = \frac{\gamma E_0}{100} = \frac{\gamma q_0}{100}, \qquad (56)$$

где E_0 (или иначе q_0) - номинальная эффективность.

3.2.24. При $E < E_{кр}$, т.е. $q < q_{кр}$ считается, что система находится в состоянии отказа и пропускная способность системы $q = 0$. Поэтому все состояния из подмножества $\mathcal{E}$,имеющие $q < q_{кр}$, при расчете коэффициента сохранения эффективности не учитываются. Состояния из подмножества $\mathcal{F}$, имеющие $q \geq q_{кр}$, считаются состояниями работоспособности системы.

3.2.25. Для простейших трубопроводных систем оценка коэффициента сохранения эффективности и других показателей эффективности производится методом перебора состояний, который заключается в следующем. Для всех возможных состояний подсчитывается эффективность системы. Затем в зависимости от эффективности системы в каждом из состояний все множество состояний разбивается на два указанных выше подмножества $\mathcal{F}$ и $\mathcal{E}$ с учетом заранее выбранного значения критической эффективности. Подсчитываются вероятности всех состояний подмножества $\mathcal{F}$ (состояний работоспособности) и по формуле (49) оценивается коэффициент сохранения эффективности. Расчет удобно производить по форме (табл.I).

3.2.26. Для технических систем, элементы которых могут находиться только в двух состояниях - в состоянии работоспособности и в состоянии отказа, число возможных состояний системы подсчитывается по формуле

$$N = 2^n, \qquad (57)$$

где n - число элементов системы.

3.2.27. Такие системы носят название "булевых систем". Нефте- и газопроводные системы с максимально укрупненными элементами, в которых элементами считаются однониточные участки линейной части между перекачивающими станциями и сами перекачивающие станции, не относятся к булевым системам, поскольку

Таблица I

Расчет эффективности сложной системы методом прямого перебора

Индекс состояния системы	Состояния элементов x_i					Эффективность системы по состояниям E	Вид подмножества ($\mathcal{F}$ или $\mathcal{E}$)	Вероятность каждого состояния систем h
	Элемент №							
	№I	№2	№3	...	№ n			
H_0	I	I	I	...	I	E_0	$\mathcal{F}$	h_0
H_1	0	I	I	...	I	E_1	($\mathcal{F}$ или $\mathcal{E}$)	h_1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_{1,2,\ldots,n}$	0	0	0	...	0	$E_{1,2\ldots n}$	$\mathcal{E}$	$h_{1,2,\ldots}$

Примечание. В табл.I x_i = I означает, что i-ый элемент работоспособен, а x_i = 0 – что i-ый элемент находится в состоянии отказа.

перекачивающие станции могут иметь более одного состояния работоспособности (в зависимости от числа работающих агрегатов). Число возможных состояний таких систем весьма велико.

3.2.28. Подсчитаем, например, число состояний двухниточной системы с тремя компрессорными станциями (имеющими каждая по три рабочих и одному резервному агрегату). Превратим эту систему в булеву систему, считая элементом системы каждый рабочий агрегат перекачивающей станции,и воспользуемся формулой (57). Наличие резервных агрегатов не изменит числа возможных состояний системы, влияя только на вероятность нахождения системы в разных состояниях. Поэтому число возможных состояний системы по формуле (57) будет составлять

$$N = 2^{17} = 131072,$$

где $n = 8 + 9$;

8 – общее число элементов линейной части;

9 – общее число рабочих агрегатов на компрессорных станциях (см.рис.2).

Проанализировать столь большое количество состояний системы методом прямого перебора не представляется возможным.Поэтому на практике для оценки показателей эффективности сложных систем применяют более совершенные методы. Этому вопросу посвящены многие работы, например [7-9], и другие. Методика подсчета вероятностей состояний при использовании метода прямого перебора приведена ниже.

3.2.29. Нефте- или газотранспортная система, состоящая из n элементов (участков линейной части между перекачивающими станциями, перекачивающих станций и др.), может находиться в конечном (счетном) множестве следующих состояний: 1) все элементы могут быть работоспособными (состояние H_0 в табл.1), имея максимум производительности; 2) один, два или более элементов могут быть в неработоспособном состоянии, т.е. в состоянии отказа, а другие – в состоянии работоспособности (состояния H_i, $H_{i,j}$) и т.д.; 3) все элементы системы могут находиться в состоянии отказа (состояние $H_{1,2,...,n}$). При этом каждый элемент системы может находиться в том или ином состоянии работоспособности, или в состоянии отказа, которое, как и для системы в целом, для любого элемента характеризуется неравенством $q < q_{кр_i}$ (причем $q_{кр_i}$ для элементов подсчитывается исходя из назначенного $q_{кр}$ системы в целом). Любая нефте- или газотранспортная система является системой, состоящей из взаимно независимых элементов, поскольку, например, отказ участка линейной части в принятой выше формулировке не изменяет технического состояния, а следовательно, вероятности отказа любой из перекачивающих станций и, наоборот, отказ на перекачивающей станции, т.е. переход ее в состояние $q < q_{кр_i}$, не повлияет на техническое состояние, а следовательно, и на вероятность отказа линейной части или других укрупненных элементов системы. Для систем со сложной структурой, состоящих из взаимно независимых элементов, вероятность каждого из возможных состояний системы определяется, как указывалось в п.3.2.13, последовательным перемножением всех коэффициентов готовности или для начального периода эксплуатации перемножением всех начальных вероятностей безотказной работы элементов, принятых в данном состоянии за работоспособные, и всех коэффициентов "неготовности", или для начального периода эксплуатации – всех начальных вероятностей отказа элементов, принятых в данном состоянии за неработоспособные (отказавшие). Так, если рассматривать работу системы в начале эксплуатации, вероятности ее состояний будут следующими. Для состояния H_0 (когда все n элементов работоспособны)

$$h_0 = \prod_{k=1}^{n} P_{0k}. \qquad (58)$$

Для состояния H_i (когда только один i - й элемент находится в состоянии отказа, остальные - работоспособны)

$$h_i = (1 - P_{0i}) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} P_{0k} = \frac{(1 - P_{0i})}{P_{0i}} h_0 = \alpha_i h_0. \qquad (58а)$$

Для состояния H_{ij} (когда два элемента i -й и j -й находятся в состоянии отказа, остальные - работоспособны):

$$h_{ij} = (1 - P_{0i})(1 - P_{0j}) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^{n} P_{0k} = \alpha_i \alpha_j h_0. \qquad (58б)$$

Для состояния $H_{1,2,\ldots,n}$ (когда все элементы находятся в состоянии отказа)

$$h_{1,2,\ldots,n} = h_0 \prod_{k=1}^{n} \alpha_k = \prod_{k=1}^{n} (1 - P_{0k}). \qquad (58в)$$

В реккурентных формулах (58)-(58в):

$h_0, h_i, \ldots, h_{1,2,\ldots,n}$ - вероятности нахождения системы в состояниях $H_0, \ldots, H_{1,2,\ldots,n}$;

$P_{0i}, P_{0j}, \ldots, P_{0k}$ - начальная надежность i -го, j -го ,... k -го элементов системы;

$$\alpha_i = \frac{1 - P_{0i}}{P_{0i}};$$

......

$$\alpha_k = \frac{1 - P_{0k}}{P_{0k}};$$

.....

$$\prod_{k=1}^{n} \alpha_k = \alpha_i \alpha_j \ldots \alpha_n.$$

3.2.30. Определив значение эффективности E_i системы в каждом из ее возможных состояний и отобрав все элементы подмножества $\mathcal{F}$ состояний работоспособности, можно вычислить коэффициент сохранения эффективности (не ниже ее γ %-ного значения):

$$K_{эф}=\sum_{i\in \mathcal{F}} W_i h_i = \frac{1}{E_0}\sum_{i\in \mathcal{F}} E_i h_i. \qquad (59)$$

Полученный коэффициент сохранения эффективности должен быть несколько ниже коэффициента, подсчитанного по формуле (49) из-за неучета всех состояний, принятых за отказовые. Однако это неизбежно в связи с нецелесообразностью эксплуатации системы, обладающей эффективностью ниже критического значения.

3.2.31. Вероятность того, что система будет обладать начальным уровнем эффективности не ниже критического (γ %-ного) значения, составит

$$P_0(i\in \mathcal{F})=\sum_{i\in \mathcal{F}} h_i, \qquad (60)$$

где h_i -вероятности состояний системы из подмножества $\mathcal{F}$ (подмножества работоспособных состояний).

3.3. Оценка надежности линейной части однониточного трубопровода по информации об отказах

3.3.1. В отличие от расчетов показателей эффективности, характеризующих нефтегазопроводные системы в целом, расчеты надежности линейной части и ее элементов имеют целью определение функции надежности и коэффициентов готовности (или их аналогов начального периода эксплуатации - показателей начальной надежности). Поэтому расчету должны подлежать показатели конструктивной надежности линейной части, описанные в разд.2. В качестве системы в разд.3.3 будет рассматриваться линейная часть однониточного подземного трубопровода на участке между двумя перекачивающими станциями (иначе - линейный участок средней протяженности 120 км). Такой участок, как указывалось выше, является основным элементом трубопроводной системы.

3.3.2. Линейная часть однониточного подземного трубопровода на участке между двумя перекачивающими станциями включает в себя следующие конструктивные элементы: прямые и упругоизогнутые участки[x], отводы (криволинейные вставки на переходах и

---

[x] Если оценка надежности производится на стадии рабочего проектирования, к прямолинейным следует относить те участки, у которых при расчете кривизны (или радиуса упругого изгиба) по вертикальным проектным (красным) отметкам кривизна оси трубопровода получается столь незначительной, что ею можно пренебречь.

поворотах, в том числе в местах компенсации температурных перемещений трубопровода), линейную арматуру, а также монтажные сварные стыки. Кроме того, в состав линейной части могут входить различные по конструкции переходы через препятствия и некоторые другие особые участки.

3.3.3. Все эти элементы последовательно включены в состав линейной части как систему, имеют свои показатели конструктивной надежности, могут в каждом конкретном случае присутствовать или отсутствовать, чередоваться или повторяться, придавая индивидуальность рассматриваемой зоне линейной части, которая, с точки зрения теории надежности, должна рассматриваться как система с последовательным соединением элементов (рис.3).

3.3.4. Перечисленные выше элементы линейной части, с точки зрения оценки их конструктивной надежности, подразделяются на протяженные (к которым относятся прямолинейные и упругоизогнутые элементы) и сосредоточенные, иначе - дискретные, к которым относятся: криволинейные элементы (отводы), элементы линейной арматуры, сварные стыки. Конструкции переходов содержат как протяженные, так и сосредоточенные элементы.

3.3.5. Учитывая последовательное соединение элементов и допущение, приведенное в п.2.2.II, об их взаимной независимости в смысле надежности, на начальном этапе эксплуатации (при работе системы до I-го отказа) конструктивная надежность (вероятность безотказной работы) системы, т.е. участка линейной части однониточного трубопровода между двумя перекачивающими станциями $P_{лч}(t)$ согласно (7), оценивается по формуле

$$P_{лч}(t) = \prod_{i=1}^{n_1} P_{пр_i}(t) \prod_{i=1}^{n_2} P_{из_i}(t) \prod_{i=1}^{n_3} P_{кр_i}(t) \prod_{i=1}^{n_4} P_{АР_i}(t) \prod_{i=1}^{n_5} P_{пер_i}(t), \qquad (6I)$$

где $n_1, \ldots, n_5$ - количество элементов в I-й,... 5-й группах однотипных элементов;

$i = 1, 2, \ldots, n$ - номера однотипных элементов;

$P_{пр_i}(t), P_{из_i}(t), P_{кр_i}(t), P_{АР_i}(t), P_{пер_i}(t)$ - соответственно надежность (вероятность безотказной работы к моменту t) прямолинейных, изогнутых (упруго), криволинейных элементов (отводов), элементов линейной арматуры (кранов, тройников), переходов;

Π – знак перемножения вероятностей.

Примечание. Участки линейной части, проходящие через области, резко отличающиеся от прочих участков по рельефу, свойствам грунтов (или каким-либо другим принципиальным для оценки надежности признакам), как и переходы, должны выделяться в самостоятельные (особые) элементы с подразделением их при необходимости на условные элементы в соответствии с п.3.4 и разд.4.

3.3.6. Порядок расположения элементов в последовательно соединенной системе (с учетом допущения о взаимной независимости элементов) не играет роли, поэтому для удобства проведения расчетов надежности на схеме соединения элементов (см.рис.3) можно перенести все однотипные сосредоточенные элементы (кроме сварных соединений) в одну сторону, а однотипные протяженные – в другую (рис.4). Протяженные элементы при этом образуют два непрерывных участка значительной длины (прямолинейный и упругоизогнутый участки). В дальнейшем (для прогноза надежности на основе теории предельных состояний) протяженные элементы мы будем разбивать определенным образом на так называемые "условные элементы" в соответствии с п.3.4.

3.3.7. Для расчетов надежности можно принимать, что однотипные элементы линейной части обладают примерно одинаковым уровнем надежности, поэтому для вычисления вероятности безотказной работы линейного участка трубопровода на начальном этапе эксплуатации следует пользоваться формулой (15):

$$P_{лч}(t)=[P_{э(пр)}(t)]^{n_1}[P_{э(из)}(t)]^{n_2}[P_{кр}(t)]^{n_3}[P_{ар}(t)]^{n_4}[P_{пер}(t)]^{n_5}, \quad (32)$$

где $n_1, P_{э(пр)}(t); n_2, P_{э(из)}(t)$ – количество и надежность соответственно прямолинейных и упругоизогнутых условных элементов на линейном участке трубопровода;

$n_3, \ldots, n_5$ – см. (31);

$P_{кр}(t), \ldots, P_{пер}(t)$ – см. (31).

3.3.8. Вероятность отказа линейного участка на начальном этапе эксплуатации должна вычисляться согласно (17) по формуле

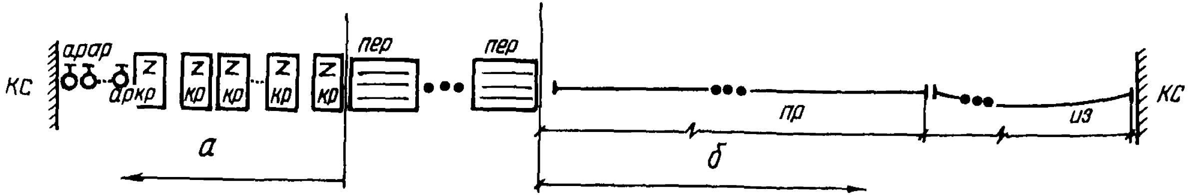

Рис.4. Условное представление структурной схемы надежности однониточного газопровода (между двумя КС) как системы:
а - совокупность последовательно соединенных протяженных (справа) и б - совокупность последовательно соединенных непротяженных (слева) элементов: пр - прямолинейный по проекту участок суммарной протяженности; из - упругоизогнутый по проекту участок суммарной протяженности; ар-элемент линейной арматуры; пер - переход через препятствие

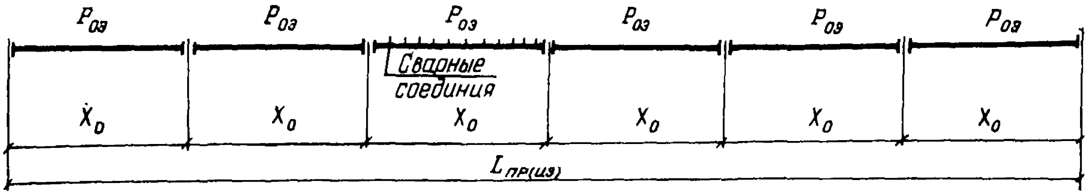

Рис.5. Расчетная модель протяженного прямолинейного (или упругоизогнутого) участка линейной части:
$L_{пр(из)}$ -суммарная протяженность прямолинейного (или упругоизогнутого) участка трубопровода; x_0-длина условного элемента линейного участка как системы последовательно соединенных условных элементов

$$F_{лч}(t) \approx n_1 F_{э(пр)}(t) + n_2 F_{э(из)}(t) + n_3 F_{кр}(t) + n_4 F_{ар}(t) + n_5 F_{пер}(t), \quad (63)$$

где n_1, n_2 – количество условных элементов в прямолинейном и упругоизогнутом участках;

n_3, n_4, n_5 – количество элементов в 3-й, 4-й, 5-й группах одноименных элементов;

$F_{э(пр)} t, \ldots, F_{пер}(t)$ – вероятность отказа элементов вышеперечисленных типов к моменту t.

3.3.9. Приближенно, с учетом пуассоновского характера потока отказов, согласно (42) вероятность отказа линейного участка между двумя перекачивающими станциями на начальном этапе эксплуатации вычисляется через интенсивности отказов элементов по формуле

$$F_{лч}(t) \approx t(n_1 \lambda_{э(пр)} + n_2 \lambda_{э(из)} + n_3 \lambda_{кр} + n_4 \lambda_{ар} + n_5 \lambda_{пер}), \quad (64)$$

где $n_1 \lambda_{э(пр)}, \ldots, n_5 \lambda_{пер}$ – интенсивности отказов групп однотипных элементов в период приработки системы (табл.2);

$\lambda_{э(пр)}, \ldots, \lambda_{пер}$ – интенсивности отказов элементов различных типов в период приработки системы.

3.3.10. Ниже, в табл.2, приведен методический пример сводки данных о средних значениях интенсивности отказов групп однотипных элементов на участке линейной части определенной длины для периодов приработки, нормальной эксплуатации и старения трубопроводов. Указанные периоды ориентировочно приняты равными соответственно: менее 3 лет, от 3 до 6 лет, более 6 лет. Значения в табл.2 для каждой группы элементов приведены для отрезка линейной части единичной протяженности, равной 1000 км и 120 км (т.е. средней протяженности линейного участка, заключенного между двумя перекачивающими станциями).

3.3.11. Чтобы по данным табл.2 получить λ-характеристики отдельных элементов каждого типа, можно считать, что в среднем единичный отрезок линейной части однониточного трубопровода включает в себя следующее количество однотипных сосредоточенных и следующие длины протяженных элементов (табл.3).

Если в линейном участке единичной длины (1000 или 120 км) содержится иное в сравнении с табличными данными количество сосредоточенных элементов или в его составе иначе, чем в табл.3, распределяются длины протяженных элементов (прямолинейных и упругоизогнутых участков), значения табл.2 должны быть скорректированы по формулам:

для сосредоточенных элементов $n'\lambda = \frac{n'}{n}(n\lambda)_{cp}$;

для протяженных элементов $n'\lambda = \frac{\ell'}{\ell}(n\lambda)_{cp}$,

где n, n^1 – соответственно табличное (по табл.3) и фактическое число однотипных сосредоточенных элементов в составе 1000 или 120-километрового линейного участка;

ℓ, ℓ' – соответственно табличное (по табл.3) и фактическое значения суммарной длины однотипных протяженных элементов (например, прямолинейных элементов) на участке линейной части единичной длины (1000 или 120 км);

$(n\lambda)_{cp}$ – среднее значение интенсивности отказов группы однотипных элементов на участке линейной части единичной длины (1000 или 120 км).

3.3.12. Функция надежности (вероятность безотказной работы) линейного участка на начальном этапе эксплуатации должна вычисляться согласно (42а) по формуле

$$P_{л.ч}(t) \approx 1 - t(n_1\lambda_{э(пр)} + n_2\lambda_{э(из)} + n_3\lambda_{кр} + n_4\lambda_{кр} + n_5\lambda_{пер}). \quad (65)$$

Например, вероятность безотказной работы линейного участка газопровода между двумя компрессорными станциями к концу 1-го года эксплуатации по формуле (65) будет составлять (по табл.2):

$$P_{л.ч}(t = 1\,год) = 1 - 0{,}065 = 0{,}935,$$

а к концу 2-го года эксплуатации

$$P_{л.ч}(t = 2\,года) = 1 - 2 \cdot 0{,}065 = 0{,}870.$$

Тот же показатель для линейной части газопровода протяженностью 1000 км к концу 1-го года эксплуатации составит согласно табл.2

$$P_{л.ч}(t = 1\,год) = 1 - 0{,}539 = 0{,}461,$$

Таблица 2

Средние значения интенсивности отказов групп однотипных элементов на участках линейной части определенной длины в различные периоды функционирования трубопроводов

Элементы линейной части трубопроводов	Значения $(n\lambda)_{ср}$ групп однотипных элементов на участках линейной части в периоды								
	приработки			нормальной эксплуатации			старения		
	на 1000 км $\left(\frac{отк}{1000\ км}\right)$ в год	на участок между КС или НС $\left(\frac{отк}{120\ км}\right)$ в год	%	на 1000 км $\left(\frac{отк}{1000\ км}\right)$ в год	на участок между КС или НС $\left(\frac{отк}{120\ км}\right)$ в год	%	на 1000 км $\left(\frac{отк}{1000\ км}\right)$ в год	на участок между КС или НС $\left(\frac{отк}{120\ км}\right)$ в год	%
Газопроводы									
Прямолинейные участки с учетом монтажных стыков $n_1\lambda_{з(пр)}$	0,227	0,027	42,20	0,353	0,042	100,0	0,543	0,065	81,58
Упругоизогнутые участки с учетом монтажных стыков $n_2\lambda_{g(из)}$	0,238	0,029	44,24	0,000	0,000	0,00	0,123	0,015	18,42
Отводы, в том числе на переходах $n_3\lambda_{кр}$	0,048	0,006	8,80	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00
Линейная арматура $n_4\lambda_{ар}$	0,026	0,003	4,76	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
Переходы (исключая отводы) и другие особые участки $n_5\lambda_{пер}$	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00
Итого ...	0,533	0,065	100	0,353	0,042	100	0,666	0,080	100

Нефтепроводы

Прямолинейные и упругоизогнутые участки вместе с учетом монтажных стыков $n_1\lambda_{э(пр)} + n_2\lambda_{э(из)}$	0,094	0,0II	44,44	0,590	0,07I	62,50	0,248	0,030	90,48
Отводы $n_3\lambda_{кр}$, в том числе на переходах	0,023	0,003	II,I2	0,307	0,037	32,50	0,000	0,000	0,00
Линейная арматура $n_4\lambda_{ар}$	0,094	0,0II	44,44	0,047	0,006	5,00	0,026	0,003	9,52
Переходы (исключая отводы) и другие особые участки $n_5\lambda_{пер}$	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00
Итого...	0,2II	0,025	I00	0,944	0,II4	I00	0,247	0,033	I00

Таблица 3

Ориентировочные средние данные о содержании конструктивных элементов в линейном участке трубопровода

Конструктивные элементы линейной части	Осредненные сведения о количестве или протяженности конструктивных элементов в составе линейного однониточного участка трубопровода протяженностью	
	1000 км	120 км
Прямолинейные по проекту участки (суммарная длина), км	720	86,4
Упругоизогнутые по проекту участки (проектные кривые упругого изгиба), суммарная длина, км,	280	33,6
из них:		
в вертикальной плоскости	200	24
в горизонтальной плоскости	80	9,6
Отводы (криволинейные вставки на поворотах и переходах через препятствия), шт.,	1670	200
из них:		
на переходах через препятствия	1000	120
на поворотах	670	80
Линейная арматура, шт.	50	6
Подводные переходы, шт.	250	30

а к концу 2-го года эксплуатации

$$P_{лч}(t=2\,года)=1-2\cdot 0{,}539=-0{,}078=0,$$

так как показатель $P(t)$ не может быть отрицательным.

Это означает, что при интенсивности отказов элементов, соответствующей данным табл.2, на линейной части газопровода длиной 1000 км к концу второго года эксплуатации обязательно произойдет хотя бы один отказ (хотя надежность каждого отдельного участка линейной части между КС остается еще сравнительно высокой).

3.3.13. Параметр потока отказов линейного участка в начальный период его эксплуатации ω_c согласно (43) с учетом пуассоновского характера потока отказов должен вычисляться по формуле

$$\omega_c^{нач} \approx n_1 \lambda_{э(пр)} + n_2 \lambda_{э(из)} + n_3 \lambda_{кр} + n_4 \lambda_{Ар} + n_5 \lambda_{пер}. \quad (66)$$

3.3.14. Важным показателем начального уровня надежности является среднее время работы линейного участка до первого отказа, которое с учетом пуассоновского характера потока отказов должно вычисляться по приближенной формуле

$$T_{ср}^{(1\text{-го отк.})} \approx \frac{1}{\omega_c^{нач}} = \frac{1}{n_1 \lambda_{э(пр)} + n_2 \lambda_{э(из)} + n_3 \lambda_{кр} + n_4 \lambda_{Ар} + n_5 \lambda_{пер}}. \quad (67)$$

Например, по данным табл.2, среднее время работы линейного участка газопровода длиной 1000 км до первого отказа приближенно составляет

$$T_{ср}^{(1\text{-го отк})} = \frac{1}{0{,}539} \approx 2 \text{ года}.$$

Очевидно, чем выше данный начальный показатель, тем лучше (надежнее) сооружен трубопровод.

3.3.15. Коэффициент готовности линейного участка между двумя перекачивающими станциями в начальный период эксплуатации, т.е. его начальная надежность, в соответствии с формулой (44) должен вычисляться через параметр потока отказов системы, иначе - через интенсивности отказов элементов по формуле

$$K_г = P_0 \approx 1 - T_0 (n_1 \lambda_{э(пр)} + n_2 \lambda_{э(из)} + n_3 \lambda_{кр} + n_4 \lambda_{Ар} + n_5 \lambda_{пер}), \quad (68)$$

$n_1 \lambda_{э(пр)}, \ldots, n_5 \lambda_{пер}$ - интенсивности отказов групп элементов, приходящиеся на 120 км (табл.2);

T_0 - среднее время восстановления системы в годах (линейного участка) после отказа, принимаемое для линейного участка трубопровода одинаковым при отказе любого из последовательно соединенных элементов равным T_0 =3 сут. = 0,00822 года.

3.3.16. По данным табл.2 легко подсчитать, используя формулу (68), что значение начального коэффициента готовности (уровень начальной надежности) участка линейной части, заключенного между двумя перекачивающими станциями, будет ориентировочно составлять

для газопроводов $K_г$ = 0,9995;

для нефтепроводов $K_г$ = 0,9998.

3.4. <u>Модель оценки надежности протяженного (прямолинейного или упругоизогнутого) элемента (участка) линейной части</u>

3.4.1. Для одного и того же момента времени показатели надежности, например, вероятность безотказной работы, начальная надежность в каждой точке (каждом поперечном сечении) линейного участка магистрального трубопровода непрерывно изменяются в зависимости от продольной координаты, являясь случайными функциями по длине трубопровода. Это объясняется (при неизменной конструкции трубопровода) случайными колебаниями нагрузки от упругого изгиба, от массы грунта засыпки над трубопроводом и т.д. в зависимости от продольной его координаты, а также случайными колебаниями прочности трубопровода по его длине при переходе от трубы к трубе. Для упрощения оценки надежности линейных участков трубопровода с учетом протяженности таких элементов должна быть принята следующая расчетная математическая модель:

3.4.2. Непрерывный протяженный линейный участок магистрального трубопровода условно представляется в виде системы из последовательно соединенных элементов одинаковой протяженности (рис.5).

3.4.3. В пределах длины условного элемента показатель надежности (например, начальной безотказности) характеризуется величиной $P_{o(э)}$, методика расчета которой приведена в разд.4.

3.4.4. Количество (соответственно и протяженность) условных элементов на каждом линейном участке трубопровода зависит от суммарной протяженности рассматриваемого линейного участка данного типа (прямолинейного или упругоизогнутого) и конструкции этого участка (количества отводов, арматурных и других элементов, прерывающих, т.е. дискретизирующих рассматриваемый непрерывный участок). Условные элементы вводятся только для сокращения трудоемкости расчетов надежности, чтобы не рассчитывать в отдельности каждый элемент такого многоэлементного объекта, как участок линейной части расчетной длины, заключенный между двумя перекачивающими станциями. В соответствии с п.3.3.6 и рис.4 условную непрерывную нить, суммирующую протяженности отдельных участков одного типа (например, прямолинейных по проекту), следует разбить на количество условных элементов, соответствующее числу отрезков данного типа, содержащихся в расчетном участке. Разбивка на элементы должна производиться в соответствии с примечанием, приведенным в п.3.3.5.

3.4.5. С учетом п.3.4.4 протяженность условных элементов определенного типа (прямолинейных или упругоизогнутых) вычисляется как средняя длина отрезка такого типа по формуле

$$x_0 = \frac{L}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \ell_i}{n},$$

где $L=\sum_{i=1}^{n}\ell_i$ – суммарная протяженность отрезков (составляющих) данного типа в расчетном линейном участке;

n – количество отрезков (составляющих) данного типа, соответствующее числу условных элементов.

3.4.6. Считаем, что условные элементы данного типа (как и реальные отрезки линейного участка, отделяющиеся друг от друга элементами других типов) взаимно стохастически независимы, иначе все условные элементы данного типа в составе линейного участка образуют последовательно соединенную систему с независимыми элементами.

3.4.7. Учитывая отсутствие стохастической связи между условными элементами (точнее – слабость такой связи), начальная безотказность системы $P_{0(c)}$, состоящей из последовательно соединенных условных элементов, оценивается по формуле

$$P_{0(c)} = P_{0(э)}^{\,n},$$

где $P_{0(э)}$ – начальная надежность условного элемента;

n – количество условных элементов.

3.4.8. Как указывалось в п.2.2.II, этой формулой можно пользоваться также и для приближенной оценки безотказности системы, состоящей из зависимых элементов, поскольку эта формула дает заниженную, т.е. "безопасную" (пессимистическую) оценку надежности [2].

3.4.9. Замена отрезков реальной длины условными элементами такого же типа справедлива, если надежности однотипных составляющих (отрезков) в действительности примерно одинаковы, что обычно и имеет место. Если такое различие значительно, оценка начальной надежности системы (условного протяженного участка, состоящего из отдельных участков данного типа) должна производиться без использования осредненных по длине условных элементов, т.е. по формуле

$$P_{0(c)} = \prod_{i=1}^{n} (P_{0(э)})_i ,$$

где i – номер составляющих (отрезков) протяженного участка данного типа;

$(P_{0(э)})_i$ – начальная надежность i -го отрезка протяженного участка данного типа.

3.4.10. В п.3.8.15 будет показано, что при наличии статистической информации об отказах реальных трубопроводов (а такая информация имеется) прогнозирование уровня надежности прямолинейных или упругоизогнутых условных элементов с учетом фактора времени возможно проводить на основе знания начального уровня надежности этих элементов. В частности, надежность условного протяженного элемента к моменту I-го отказа расчетного участка линейной части (заключенного между двумя соседними перекачивающими станциями) будет выражаться условием вида

$$P_э(t_{1отк}) = 1 - \mathcal{F}(P_0, T_0, t_1, t_2, t_3, m_1, m_2),$$

где $P_э(t_{1отк})$ – надежность условного протяженного элемента линейной части к моменту I-го отказа расчетного участка;

$\mathcal{F}(P_0, T_0, t_1, t_2, t_3, m_1, m_2)$ – определяемая в п.3.8.15 функция нескольких переменных: начальной надежности, времени восстановления, известных из статистики отказов длительностей периодов приработки, нормальной эксплуатации, старения и соотношений интенсивностей отказов в эти периоды.

3.4.II. С учетом п.3.4.IO следует считать, что основной задачей настоящих Рекомендаций является задача оценки начальной надежности, т.е. уровня надежности в начальный момент эксплуатации (при $t = 0$) условных (прямолинейных или упругоизогнутых) элементов. Эту задачу будем решать, используя теорию выбросов [IO,I4].

В соответствии с теорией выбросов оценка начальной надежности протяженного элемента с учетом его длины производится из условия

$$P_{0(э)} = P_{0(э)}(\ell) = P_0(0)\ P_0(\ell/\Omega), \qquad (69)$$

где $P_0(0)$ – начальная надежность в начальном по длине сечении протяженного элемента, точнее – в наиболее напряженной точке этого сечения, т.е. в случае, когда $\ell = 0$; если все сечения условного элемента идентичны, можно считать $P_0(0)$ оценкой для любого сечения условного элемента;

$P_0(\ell/\Omega)$ – условная начальная надежность протяженного элемента длиной ℓ, т.е. вероятность того, что начальный отказ элемента (при $t = 0$) не произойдет ни в каком его сечении по длине при условии (обозначенном ℓ/Ω), что он не произошел в начальном (или в каком-либо ином) сечении (в какой-либо точке) этого элемента.

3.4.I2. Для высоконадежных объектов, каким является протяженный элемент линейной части при $t = 0$, существует приближенная формула для оценки условной вероятности $P_0(\ell/\Omega)$:

$$P_0(\ell/\Omega) \approx 1 - \overline{N(\ell/\Omega)}, \qquad (70)$$

где $\overline{N(\ell/\Omega)}$ – математическое ожидание числа выбросов условной случайной функции $\mathcal{V}(\ell/\Omega)$, называемой условной случайной функцией качества, например напряжений, при условии, что в точке $\ell = 0$ все реализации этой случайной функции находятся в пределах допустимой области Ω .

3.4.13. С учетом формулы (70) условие (69) для оценки начальной надежности протяженного элемента будет иметь вид

$$P_{0(э)} = P_{0(э)}(\ell) = P_0(0)\left[1 - \overline{N(\ell/\Omega)}\right]. \qquad (71)$$

3.4.14. Условный протяженный (прямолинейный или упруго-изогнутый) элемент линейной части магистрального трубопровода состоит из отдельных труб, сваренных между собой. Поэтому при оценке начальной надежности условного протяженного элемента линейной части следует учитывать эту особенность его конструкции, рассматривая условный элемент как систему из последовательно соединенных зависимых элементов. В качестве элементов следует рассматривать двухэлементные узлы, каждый из которых состоит из сварного соединения и примыкающего к нему с одной стороны трубного участка протяженностью до следующего монтажного стыка.

3.4.15. Оценку начальной надежности трубного участка (без сварного соединения) следует производить по формуле (69).

3.5. <u>Принципы учета надежности монтажных сварных соединений трубопроводов и перехода к надежности условного элемента</u>

3.5.1. Монтажное сварное соединение с примыкающими участками трубопровода образует неразъемное агрегатное соединение – узел, состоящий из основного металла труб и наплавленного металла сварного шва. Разрушение (отказ) такого соединения практически всегда (за исключением случая образования свищей) затрагивает не только сварной шов, но и прилегающие к нему участки основного металла труб. Поэтому, с точки зрения надежности, сварные соединения и примыкающие участки труб являются зависимыми элементами с высокой степенью стохастической связи (практически – с функциональной связью), оцениваемой в формуле (20) коэффициентом ψ , принимающим в этом случае значение, близкое к $\psi = 1$.

3.5.2. В СНиП II-45-75 записано требование о том, что монтажные сварные соединения должны быть равнопрочны основному металлу труб. Требование обеспечения равнонадежности сварного соединения и основного металла труб с учетом всех предельных состояний, лимитирующих надежность сварных соединений (предельных состояний по прочности, деформативности, трещиностойкости), лишено практического смысла, однако записанное в СНиП П-45-75 требование равнопрочности (точнее - равнонадежности по I-му предельному состоянию) должно быть удовлетворено.

Рассмотрим случай, когда указанные выше элементы (сварные соединения и примыкающий с любой стороны участок основного металла труб) равнонадежны по I-му предельному состоянию, т.е.

$$P_{c.c}(t) \approx P_{o.м}(t) = P(t),$$

где $P_{c.c}(t)$ - надежность (вероятность безотказной работы) сварного соединения по I-му предельному состоянию;

$P_{oм}(t)$ - надежность (вероятность безотказной работы) основного металла (трубных участков) по I-му предельному состоянию.

С учетом п.3.5.I и формулы (20) определим надежность системы, состоящей из 2-х элементов - монтажного сварного соединения и трубного участка

$$P_c(t) = [P(t)]^2 + \varphi[P(t)][1-P(t)] = P^2(t) + 1 \cdot P(t)[1-P(t)] = P(t), \qquad (72)$$

где $P_c(t)$ - надежность двухэлементной системы, состоящей из монтажного сварного соединения и примыкающего (с любой стороны) трубного участка по I-му предельному состоянию (по критерию прочности);

$P(t) = P_{c.c}(t) = P_{o.м}(t)$ - надежность по критерию прочности любого из указанных выше равнонадежных по этому критерию элементов.

3.5.3. Условие (72) означает, что надежность указанной двухэлементной системы равна надежности одного элемента, что и понятно для агрегатного соединения (узла), отказы элементов в котором практически всегда взаимно обусловлены.

Таким образом, если монтажное сварное соединение и примыкающий к нему (с любой стороны) участок трубы имеют примерно одинаковую по критерию прочности надежность, уровень надежности системы из этих 2-х элементов (уровень надежности узла) по тому же критерию равен уровню надежности одного из этих элементов.

3.5.4. В разд.5 показано, как можно добиться того, чтобы показатели начальной надежности элементов рассматриваемой двухэлементной системы (состоящей из монтажного сварного соединения и примыкающего с любой стороны участка основного металла трубы) по критерию прочности были бы равны, т.е.

$$P_{0(c.c)} = P_{0(a.м)}, \tag{73}$$

где $P_{0(c.c)}, P_{0(a.м)}$ – начальная надежность соответственно сварного соединения и основного металла трубы (по критерию прочности).

В этом случае для оценки начальной надежности указанной двухэлементной системы (узла) правомерно использование соотношения (72), т.е. правомерно считать сварное соединение с примыкающим (к одной из сторон) трубным участком как единый элемент с показателем начальной надежности

$$P_{0(c)} = P_{0(c.c)} = P_{0(a.м)}, \tag{74}$$

где $P_{0(c)}$ – начальная надежность указанной выше двухэлементной системы по I-му предельному состоянию.

3.5.5. Из формулы (72) очевидно, что надежность рассматриваемого двухэлементного узла при соблюдении условия равнонадежности, т.е. при $P_{(c.c)}(t)=P_{(aм)}(t)=P(t)$, колеблется в зависимости от значений $0 \leq \varphi \leq$ I в пределах от $P^2(t)$ до $P(t)$. Точно так же начальная надежность при изменении φ от 0 до I возрастает от P_0^2 до P_0. Поскольку значение φ узла практически равно I, рассматривать стыки и трубы как независимые элементы (при $\varphi = 0$), пользуясь правилом перемножения вероятностей, нельзя. Это приведет к чрезвычайно большому занижению надежности линейной части.

3.5.6. Если монтажный сварной стык и прилегающие участки основного металла трубы не равнонадежны, т.е. когда $P_{c.c}(t)<P_{ам}(t)$, надежность такой системы из двух элементов приобретает промежуточное значение $P_{c.c}(t)<P_c(t)<P_{ам}(t)$, составляющее

$$P_c(t)=P_{c.c}(t)\,P_{ам}(t)+\varphi\sqrt{P_{c.c}(t)[1-P_{c.c}(t)]P_{ам}(t)[1-P_{a.м}(t)]}, \quad (75)$$

где $\varphi \approx 1$.

В этом случае для оценки начальной надежности указанной выше двухэлементной системы (узла) следует использовать соотношение, аналогичное соотношению (75), имеющее вид

$$P_{0(c)}=P_{0(c.c)}P_{0(a.м)}+\varphi\sqrt{P_{0(c.c)}(1-P_{0(c.c)})P_{0(a.м)}(1-P_{0(aм)})}, \quad (76)$$

где $\varphi \approx 1$.

3.5.7. Как в случае равнонадежности, так и в случае неравнонадежности сварных соединений и основного металла труб по критерию прочности, вычисление оценки начальной надежности условного протяженного элемента как системы последовательно соединенных двухэлементных узлов, обладающих начальной надежностью $P_{0(c)}$, рассчитанной по условию (74) или (76), должно производиться с учетом стохастической взаимосвязи между рассмотренными выше двухэлементными узлами по формуле (20). Более точную оценку начальной надежности условного элемента (с учетом стохастической неравнонадежности узлов в составе условного элемента) следует производить по формуле

$$P_{0(э)}=P_{0i}P_{0j}+\varphi\sqrt{P_{0i}(1-P_{0i})P_{0j}(1-P_{0j})}, \quad (76а)$$

где P_{0i}, P_{0j} – начальные надежности объединяемых соседних узлов (а в дальнейшем, по мере объединения – соседних укрупненных элементов).

3.5.8. Формула (20) или (76а) последовательно применяется для оценки надежности всех пар соседних двухэлементных узлов, затем – всех пар соседних (уже укрупненных) элементов, содержащих каждый по 4 первоначальных узла и т.д. Ввиду быстрого возрастания длин объединяемых элементов указанная процедура быстро приводит к оценке надежности условного элемента в целом. По мере объединения стохастическая связь между возрастающими по длине элементами быстро ослабевает, однако полностью не исчезает, в силу общности режима работы элементов и механической связи между элементами по концам. При этом коэффициент φ уменьшается от значения $\varphi = 1$ до меньшего значения, но отличного от $\varphi = 0$ (в конкретных случаях коэффициент φ уменьшался до $\varphi = 0{,}3$–$0{,}4$).

3.5.9. Анализ характера затухания автокорреляционной функции случайной функции надежности по длине трубопровода, выполненный при разработке настоящих Рекомендаций, показал, что для определения значения φ на каждом шаге объединения элементов при оценке начальной надежности условного протяженного элемента (как системы) может быть использовано следующее простое правило:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{n}}, \tag{77}$$

где n – номер очередного объединения.

Например, если число операций объединения равно 7 (что бывает, когда число труб в условном элементе равно 128), значения φ на каждом этапе убывают в следующем порядке: 1; 0,7; 0,55; 0,5; 0,445; 0,41; 0,38.

3.6. <u>Характеристика случайных факторов, участвующих в оценке надежности</u>

3.6.1. Свойства материалов труб, геометрия труб и трубопровода, нагрузки и другие факторы, рассматриваемые в настоящих Рекомендациях, носят случайный характер, отражающий наряду с их изменчивостью, вызванной технологией перекачки, качество исходных материалов, производства строительно-монтажных работ и эксплуатации.

3.6.2. <u>Внутреннее давление Р</u> является при установившемся режиме работы трубопровода стационарным случайным процессом. При вычислении начальной надежности внутреннее давление должно рассматриваться как случайная величина, так как в любом сечении случайного процесса (в том числе в сечении, где $t = 0$) этот случайный процесс вырождается в случайную величину.

3.6.3. <u>Температурный перепад</u> рассматривается как разность случайного процесса температуры эксплуатации и фиксированной (заданной проектом) температуры фиксации расчетной схемы при строительстве

$$\tilde{\tilde{\Delta t}} = \tilde{t}_{экспл} - t_{ф}.$$

3.6.4. Фактическая температура фиксации расчетной схемы при строительстве $t_{ф}$ является в достаточной мере неопределенной. Действительные пределы ее изменения относительно расчетного значения трудно установить, поскольку они зависят от точности соблюдения при строительстве проектных требований к этому параметру. При надлежащем контроле изменчивость этой величины (в сторону ее снижения) может быть сведена к нулю. Это дает основание не считать данный фактор случайным. Изменчивость величины $t_{ф}$ в сторону ее повышения по сравнению с заданной может расчетом надежности не учитываться, что пойдет в запас надежности.

3.6.5. Как и внутреннее давление, температура эксплуатации является случайным процессом $\tilde{\tilde{t}}_{экспл}$, а при расчете начального уровня надежности этот фактор следует представить в виде случайной величины $\tilde{t}_{экспл}$. Таким образом, температурный перепад в настоящих Рекомендациях принимается в виде случайной величины

$$\Delta\tilde{t} = \tilde{t}_{экспл} - t_{ф},$$

где $\tilde{t}_{экспл}$ – случайная величина температуры эксплуатации трубопровода;

$t_{ф}$ – детерминированная, заданная проектом температура фиксации расчетной схемы.

3.6.6. Взаимосвязь температуры эксплуатации и внутреннего давления в магистрали в настоящих Рекомендациях не учитывается.

3.6.7. <u>Упругий изгиб</u> трубопровода является результатом действия двух случайных функций упругого изгиба по длине трубопровода, действующих в горизонтальной и вертикальной плоскостях [II].

3.6.8. <u>Масса грунта засыпки</u> над трубопроводом (как функция расстояния от поверхности земли до верха трубы) является случайной функцией по длине трубопровода.

3.6.9. Прочность труб является случайной функцией по длине трубопровода (при переходе от одной трубы к другой) или, при вычислении ресурса надежности в точке (сечении трубопровода),- случайной величиной. В обоих случаях учитываются результаты заводского контроля (механические испытания) и разбраковки труб.

3.6.10. Толщина стенки труб является случайной функцией по длине трубопровода (при переходе от одной трубы к другой), а при оценке надежности в точке (сечении трубопровода) случайной величиной.

3.7. Условия предельных состояний как основа оценки надежности конструкций трубопроводов

3.7.1. Оценка показателей надежности конструкций трубопроводов (начальной надежности) в разд.4 Рекомендаций производится исходя из условий неразрушимости трубопровода под влиянием реальных нагрузок при учете реальных характеристик прочности материалов и параметров качества строительно-монтажных работ.

3.7.2. Условия неразрушимости конструкции характеризуется одновременным выполнением условий предельных состояний

$$U_i(t)=R_i(t)-S_i(t)>0, \tag{78}$$

где $U_i(t)$ – запас надежности (например, запас прочности в конструкции к моменту времени t);

$S_i(t)$ – расчетный показатель (например, усилие в конструкции к моменту времени t);

$R_i(t)$ – предельное значение этого показателя (например, прочность этого элемента к моменту времени t);

i – номер (тип) предельного состояния, принятого в качестве условия отказа.

3.7.3. Начальная вероятность безотказной работы конструктивного элемента трубопровода (вероятность его наразрушимости при вступлении в эксплуатацию) в самом общем случае выражается вероятностью одновременного выполнения неравенств

$$U_1=R_1-S_1>0; \tag{79}$$

$$U_2=R_2-S_2>0; \tag{79a}$$

$$U_3 = R_3 - S_3 > 0; \qquad (79б)$$

$$U_4 = R_4 - S_4 > 0, \qquad (79в)$$

т.е. условиями вида

$$P_{0(э)_1} = P(U_1 > 0) = P[(R_1 - S_1) > 0]; \qquad (80)$$

$$P_{0(э)_2} = P(U_2 > 0) = P[(R_2 - S_2) > 0]; \qquad (80а)$$

$$P_{0(э)_3} = P(U_3 > 0) = P[(R_3 - S_3) > 0]; \qquad (80б)$$

$$P_{0(э)_4} = P(U_4 > 0) = P[(R_4 - S_4) > 0], \qquad (80в)$$

где $U_1, ... U_4$ – начальный запас прочности, устойчивости, деформативности или трещиностойкости конструктивного элемента с учетом соответствующего предельного состояния

$R_1 S_1, ... R_4, S_4$ – соответственно несущая способность и расчетное усилие конструктивного элемента трубопровода с учетом I-го, 2-го, 3-го и 4-го предельных состояний (по прочности, устойчивости, деформативности, трещиностойкости).

3.7.4. Начальная вероятность отказа расчетного участка трубопровода (однониточного участка между двумя перекачивающими станциями) с учетом формулы (44а) определяется из условия

$$F_{0(л.ч)} \approx F_{0(пр)} + F_{0(из)} + n_3 F_{0(кр)} + n_4 F_{0(АР)} + n_5 F_{0(пер)}, \qquad (8I)$$

где $n_3 - n_5$ – по формуле (63);

$F_{0(пр)}, F_{0(из)}$ – начальные вероятности отказа прямолинейной и упругоизогнутой частей расчетного участка линейной части;

$F_{0(кр)}, F_{0(АР)}, F_{0(пер)}$ – начальные вероятности отказа отвода, элемента линейной арматуры, перехода (без отводов).

3.7.5. Одновременное наступление различных предельных состояний невозможно, следовательно, события, заключающиеся в одновременном наступлении разнородных предельных состояний участка трубопровода, несовместимы. Поэтому начальная вероятность отказа составляющих расчетного участка трубопровода (однониточного участка трубопровода между двумя перекачивающими станциями) с учетом возможности наступления любого из предельных состояний (как вероятность наступления любого из несовместимых событий) будет равна:

для прямолинейной (аналогично- для упругоизогнутой) части расчетного участка

$$F_{0(ПР)} = 1 - P_{0(ПР)} = F_{0(ПР)_1} + F_{0(ПР)_2} + F_{0(ПР)_4} = (1 - P_{0(ПР)_1}) + (1 - P_{0(ПР)_2}) + (1 - P_{0(ПР)_4}), \tag{82}$$

где $F_{0(ПР)_1}$, $P_{0(ПР)_1}$; $F_{0(ПР)_2}$, $P_{0(ПР)_2}$; $F_{0(ПР)_4}$, $P_{0(ПР)_4}$ - соответственно начальные вероятности отказа и функции ресурса надежности прямолинейной (или упругоизогнутой) части расчетного участка трубопровода при расчете по I-му, 2-му, 4-му предельным состояниям;

для отводов:

$$F_{0(КР)} = F_{0(КР)_1} + F_{0(КР)_3} + F_{0(КР)_4} = (1 - P_{0(КР)_1}) + (1 - P_{0(КР)_3}) + (1 - P_{0(КР)_4}), \tag{83}$$

где $F_{0(КР)_1}$, $P_{0(КР)_1}$; $F_{0(КР)_3}$, $P_{0(КР)_3}$; $F_{0(КР)_4}$, $P_{0(КР)_4}$ - соответственно начальная вероятность отказа и функция ресурса надежности отвода при расчете по I-му, 3-му и 4-му предельным состояниям;

для арматурных элементов (кранов, задвижек):

$$F_{0(АР)} = F_{0(АР)_1} + F_{0(АР)_4} = (1 - P_{0(АР)_1}) + (1 - P_{0(АР)_4}), \tag{84}$$

где $\left.\begin{matrix} F_{0(АР)_1}, P_{0(АР)_1} \\ F_{0(АР)_4}, P_{0(АР)_4} \end{matrix}\right\}$ - соответственно начальная вероятность отказа и функция ресурса надежности арматурного элемента при расчете по I-му и 4-му предельным состояниям;

для переходов (без учета отводов) расчетное условие для определения $F_{0(пер)}$ выбирается в соответствии с конструкцией перехода и условиями его работы.

3.7.6. С учетом разбивки на определенное количество условных элементов, содержащихся в протяженной (прямолинейной, аналогично - в упругоизогнутой) части расчетного участка при расчете надежности, условие (82) должно иметь вид

$$F_{0(ПР)} = 1 - P_{0(ПР)} = n_1(F_{0Э(ПР)_1} + F_{0Э(ПР)_2} + F_{0Э(ПР)_4}) = \\ = n_1(1 - P_{0Э(ПР)_1}) + n_1(1 - P_{0Э(ПР)_2}) + n_1(1 - P_{0Э(ПР)_4}), \quad (85)$$

где $\left.\begin{matrix} F_{0Э(ПР)_1}, P_{0Э(ПР)_1} \\ F_{0Э(ПР)_2}, P_{0Э(ПР)_2} \\ F_{0Э(ПР)_4}, P_{0Э(ПР)_4} \end{matrix}\right\}$ - соответственно начальные вероятности отказа и начальные надежности прямолинейного (аналогично упругоизогнутого) условного элемента при расчете по I-му, 2-му и 4-му предельным состояниям;

n_1 - количество условных прямолинейных (аналогично n_2 для упругоизогнутых) элементов в расчетном участке линейной части.

3.7.7. Окончательно выражение для вычисления начальной вероятности отказа расчетного участка трубопровода (однониточного линейного участка, заключенного между двумя перекачивающими станциями) с учетом возможности достижения различных предельных состояний имеет вид

$$F_{0(Л.Ч)} = 1 - P_{0(Л.Ч)} \approx n_1(F_{0Э(ПР)_1} + F_{0Э(ПР)_2} + F_{0Э(ПР)_4}) + \\ + n_2(F_{0Э(ИЗ)_1} + F_{0Э(ИЗ)_2} + F_{0Э(ИЗ)_4}) + n_3(F_{0(КР)_1} + F_{0(КР)_3} + \\ + F_{0(КР)_4}) + n_4(F_{0(АР)_1} + F_{0(АР)_4}) + n_5 F_{0(пер)}. \quad (86)$$

Выражение для вычисления начальной надежности расчетного участка линейной части с учетом возможности достижения различных предельных состояний имеет вид

$$P_{0(л.ч)} = 1 - F_{0(л.ч)} \approx 1 - n_1(3 - P_{оэ(пр)_1} - P_{оэ(пр)_2} - P_{оэ(пр)_4}) - \tag{86а}$$
$$- n_2(3 - P_{оэ(из)_1} - P_{оэ(из)_2} - P_{оэ(из)_4}) - n_3(3 - P_{0(кр)_1} -$$
$$- P_{0(кр)_3} - P_{0(кр)_4}) - n_4(2 - P_{0(ар)_1} - P_{0(ар)_4}) - n_5 F_{0(пер)} .$$

П р и м е ч а н и е. Показатели начальной надежности $P_{оэ(пр)_1}$, $P_{оэ(пр)_2}$, $P_{оэ(пр)_4}$, $P_{оэ(из)_1}$, $P_{оэ(из)_2}$, $P_{оэ(из)_4}$ условного элемента вычисляются исходя соответственно из условий I-го, 2-го и 4-го предельных состояний с учетом надежности монтажных сварных соединений по формулам (77) или (77а).

3.7.8. В разд.4 рассмотрена оценка начальной надежности протяженных элементов исходя из условий прочности и устойчивости без учета возможности отказов за счет чрезмерного развития деформации и трещин. Поэтому вычисленные в соответствии с настоящими Рекомендациями результирующие оценки начальной надежности линейной части будут несколько завышенными ("оптимистическими").

3.8. <u>Регламентация и контроль показателей эффективности и надежности при проектировании и сооружении магистральных трубопроводов</u>

3.8.I. Показатели технической эффективности и конструктивной надежности магистральных трубопроводов должны задаваться и контролироваться на всех основных этапах формирования системы: на стадии разработки технико-экономического обоснования на проектирование системы (ТЭО); при рабочем проектировании и сооружении трубопроводов. Задание и контроль этих показателей должны производиться в соответствии с пп.3.8.2-3.8.4 в следующем порядке.

3.8.2. <u>На стадии ТЭО</u> :

задание, исходя из нужд района-потребителя газа (нефти), требуемых (плановых) значений эффективности (производительности, пропускной способности);

расчет для каждого из разрабатываемых конструктивных вариантов проектируемого трубопровода показателей номинальной эффективности E_0 (без учета возможных отказов) и значений плановых коэффициентов $K_{эф} = \frac{E_{пл}}{E_0}$.

Примечание. Показатели номинальной эффективности должны быть несколько выше соответствующих плановых показателей.

контрольный (поверочный) расчет значений коэффициентов $K_{эф}$ (с ориентировкой на взятые из практики эксплуатации аналогичных магистральных трубопроводов значения коэффициентов готовности укрупненных элементов системы компрессорных или насосных станций и линейной части, т.е. коэффициентов готовности, базирующихся на статистике отказов этих элементов системы).

Примечание. При проведении контрольного расчета значений $K_{эф}$ необходимо задаться γ %-ным уровнем эффективности;

отбор вариантов, имеющих контрольные (прогнозные) значения коэффициентов $K_{эф}$, наиболее близкие к плановым;

выбор окончательного варианта с учетом показателей его экономической эффективности.

3.8.3. <u>На стадии рабочего проектирования</u>:

расчетная оценка (вероятностное прогнозирование) показателей конструктивной надежности элементов расчетного участка линейной части проектируемого трубопровода, расчетного участка в целом и других расчетных участков линейной части, заключенных между соседними компрессорными (или насосными) станциями исходя из условий предельных состояний;

проверка условий безопасности эксплуатации линейной части, приведенных в пп.3.8.5–3.8.17;

проверка условия сохранения этими участками на стадии рабочего проектирования плановой эффективности. Это условие будет удовлетворено, если вычисленные на этой стадии значения коэффициентов готовности линейных однониточных участков расчетной протяженности, равной расстоянию между перекачивающими станциями, будут не менее принятых на стадии ТЭО, т.е.

$$(K_{г(л.ч)}) \geq [K_{г(л.ч)}]_{ТЭО} = [K_{эф}]_{ТЭО}, \quad (87)$$

где $K_{г(л.ч)} = (P_0)_{лч} = (K_{эф})_{лч}$ – начальный коэффициент готовности (уровень начальной надежности) или, что то же самое для однониточного трубопровода, коэффициент сохранения эффективности однониточного участка линейной части расчетной протяженности, равной расстоянию между перекачивающими станциями, вычисляемый в соответствии с условием (86а);

$[K_{г(лч)}]_{ТЭО} = [K_{эф}]_{ТЭО}$ – тот же показатель, принятый ранее на стадии ТЭО;

вероятностная оценка коэффициента сохранения эффективности всего проектируемого трубопровода в целом по найденным значениям коэффициентов готовности элементов и проверка требования

$$K_{эф} > [K_{эф}], \qquad (88)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент сохранения эффективности всего проектируемого трубопровода в целом, вычисленный на стадии рабочего проектирования;

$[K_{эф}]$ – тот же показатель, имеющий "эталонное" значение, вычисленное ранее, на стадии ТЭО.

Примечание. Расчеты на стадии рабочего проектирования коэффициентов готовности таких элементов проектируемой системы, как агрегаты компрессорных или насосных станций, и самих перекачивающих станций в настоящих Рекомендациях не рассматриваются.

вероятностная оценка (прогнозирование) функциональной надежности проектируемой системы и проверка выполнения условия $q \geq q_p$ с достаточно высокой вероятностью (60).

Условия безопасности эксплуатации линейной части

Следует считать (с учетом опыта эксплуатации ответственных строительных конструкций, как указывалось в п.3.I.2), что безопасность эксплуатации расчетного участка линейной части будет обеспечена при выполнении двух условий:

I-е условие: вычисленное по любому из характерных условий предельных состояний значение вероятности безотказной работы элемента линейной части на конец периода эксплуатации до I-го отказа расчетного участка линейной части должно быть не ниже "трехсигмового" гауссовского уровня, т.е., например, для условного протяженного (здесь – прямолинейного) элемента это условие будет иметь вид

$$P_{э(ПР)_i}(t_{1ОТК}) \geq [P_{э(ПР)_i}], \qquad (89)$$

где $P_{э(ПР)_i}(t_{1ОТК})$ – надежность (вероятность безотказной работы) условного протяженного (здесь – прямолинейного) элемента к концу периода эксплуатации расчетного (I20-километрового) участка линейной части до первого отказа (при расчете исходя из i -го предельного состояния);

$t_{1ОТК}$ – средняя (по статистике отказов) продолжительность периода работы расчетного участка линейной части до I-го отказа;

$[P_{э(ПР)_i}]$ = 0,9986 – нормативный ("3-сигмовый" гуассовский) уровень надежности элемента (здесь – условного протяженного – прямолинейного элемента) линейной части (при расчете исходя из i -го предельного состояния);

2-е условие: уровень начальной надежности (коэффициент готовности начального этапа эксплуатации) расчетного участка линейной части, вычисленный на основе условий предельных состояний, должен быть не ниже соответствующего нормативного уровня, рассчитанного исходя из статистики отказов, связанных с нарушением этих предельных состояний по аналогичным трубопроводам, т.е.(для расчетного участка линейной части L = 120км):

$$P_{0(Л.Ч)} = K^{НАЧ}_{Г(Л.Ч)} \geq [P_{0(Л.Ч)}] = [K^{НАЧ}_{Г(Л.Ч)}] \approx 1 - T_0 \Sigma(n_i \lambda_i), \qquad (90)$$

где $P_{0(Л.Ч)}, K^{НАЧ}_{Г(Л.Ч)}$ – соответственно уровень начальной надежности и начальный коэффициент готовности расчетного участка линейной части, вычисленный исходя из условий предельных состояний;

$[P_{0(Л.Ч)}], [K^{НАЧ}_{Г(Л.Ч)}]$ – соответствующие нормативные (эталонные) показатели, вычисленные по статистике отказов аналогичных трубопроводов;

$(n_i \lambda_i)$ - интенсивность отказов i -й группы однотипных элементов;

3.8.4. <u>На стадии сооружения</u> должны быть вычислены те же расчетные (прогнозные) оценки, что и на стадии рабочего проектирования в целях контроля и подтверждения заложенных в проекте показателей надежности и эффективности с учетом реального процесса формирования уровня надежности при строительстве трубопровода.

3.8.5. Рассмотрим пример проверки соблюдения при проектировании условий безопасности эксплуатации трубопроводов.

Пусть при анализе надежности расчетного участка линейной части однониточного газопровода протяженностью 120 км (заключенного между двумя КС) на стадии рабочего проектирования получены следующие данные (пп.3.8.6-3.8.9).

3.8.6. Для протяженных (прямолинейных по проекту) условных элементов, входящих в расчетный участок, установлено, что:

начальная надежность (начальная вероятность безотказной работы) условных элементов этой группы, вычисленная исходя из трех характерных условий предельных состояний, имеет во всех случаях примерно одинаковые значения:

$$P_{0(пр)_1} \approx P_{0(пр)_2} \approx P_{0(пр)_4} = 0,9999998;$$

средняя длина (протяженность) условных элементов этой группы и количество этих элементов в расчетном участке линейной части составляют (при использовании данных табл. 3):

$$\ell_0 = 550 \text{ м}, \quad n_1 = 157.$$

3.8.7. Для протяженных (упругоизогнутых по проекту) условных элементов, входящих в расчетный участок, установлено, что:

начальная надежность условных элементов этой группы, вычисленная исходя из трех характерных условий предельных состояний, имеет во всех случаях примерно одинаковые значения:

$$P_{0(из)_1} \approx P_{0(пр)_2} \approx P_{0(пр)_4} = 0,9999997;$$

средняя длина (протяженность) условных элементов этой группы и количество этих элементов в расчетном участке линейной части составляет (при использовании данных табл.3):

$$\ell_0 = 800 \text{ м}, \quad n_{2.1} = 42.$$

3.8.8. Для криволинейных элементов (отводов), входящих в расчетный участок, установлено, что:

начальная надежность отводов, вычисленная исходя из трех характерных условий предельных состояний, имеет в среднем примерно одинаковые значения:

$$P_{0(KP)_1} \approx P_{0(KP)_3} \approx P_{0(KP)_4} = 0{,}9999996;$$

количество отводов на расчетном участке (между двумя КС) составляет (при использовании данных табл.3) $n_3 = 200$.

3.8.9. Для групп элементов линейной арматуры и переходов надежность $P(t)_{AP} = P(t)_{пер} \approx 1$, т.е. принято допущение абсолютной надежности этих элементов.

3.8.10. Требуется проверить I-е и 2-е условия безопасности эксплуатации линейной части (см.п.3.8.3). Для этого необходимо, прежде всего, определить среднюю продолжительность периода работы расчетного участка линейной части до I-го отказа (используя, например, данные табл.2).

Средняя продолжительность периода работы расчетного участка линейной части (заключенного между двумя КС) до I-го отказа (при использовании табл.2) вычисляется следующим образом.

Легко показать хотя бы приближенным расчетом по формуле (22), что средняя продолжительность периода работы расчетного участка линейной части (равного расстоянию между соседними КС) до I-го отказа будет значительно больше рассчитанного в п.3.3.I для участка протяженностью 1000 км и выйдет за пределы периода приработки системы, характеризуемого начальным значением параметра потока отказов (см.п.2.4.7) $\omega_{нач}$. В этом случае согласно принятому выше допущению о том, что поток отказов системы является пуассоновским с переменным параметром, схема работы расчетного участка линейной части до I-го отказа будет такой, как показано на рис.6. Согласно данной схеме искомая средняя продолжительность периода работы расчетного участка до I-го отказа определится из условия достижения к концу этого периода уровня надежности $P_{л.ч}(t) = 0$. Иначе, если (как было при-

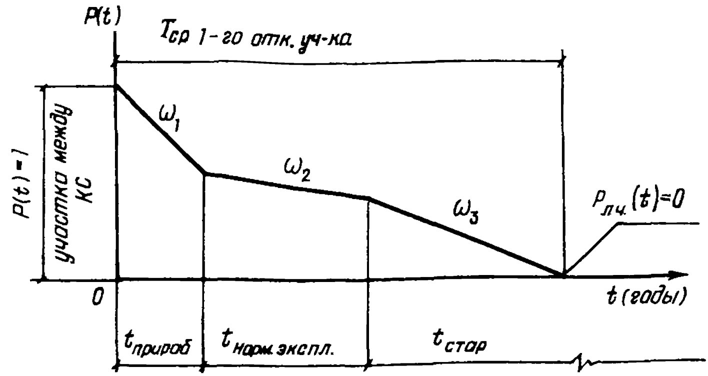

Рис.6. Кривая убыли надежности расчетного участка линейной части (равного расстоянию между соседними КС) в условиях допущения о пуассоновском (с переменным параметром) характере потока отказов

нято в п.3.3.10) продолжительности периодов приработки и нормальной эксплуатации составляют 3 года, имеем:

для периода приработки (учитывая, что $P(t=0) = 1$), по формуле (65) и табл.2:

$$P_{л.ч}^{нач}(t_1=3) = 1 - t_1\Sigma(n\lambda)_{ср}^{нач} = 1 - 3\cdot 0{,}065 = 0{,}805,$$

для периода нормальной эксплуатации

$$P_{л.ч}^{норм.\ экспл.}(t_2=3) = P_{л.ч}^{нач}(t_1=3) - t_2\Sigma(n\lambda)_{ср}^{норм.\ экспл.} = 0{,}805 - 3\cdot 0{,}042 = 0{,}679;$$

для периода старения

$$P_{л.ч}^{стар}(t_3=?) = P_{лч}^{норм\ экспл} - t_3\Sigma(n\lambda)_{ср}^{стар} = 0{,}679 - t_3 0{,}080 = 0,$$

откуда $t_3 = \frac{0,679}{0,080} = 8,5$ лет, а средняя продолжительность периода работы расчетного участка до I-го отказа составит:

$$T_{ср}^{1\text{-го отк}} = t_1 + t_2 + t_3 = 3 + 3 + 8,5 = 14,5 \text{ лет.}$$

3.8.II. Проверка I-го условия безопасности состоит в вычислении вероятности безотказной работы элемента по заданной его начальной надежности и известному из статистики отказов соотношению интенсивностей отказов в различные периоды эксплуатации трубопровода, при использовании (аналогично приведенному на рис.6) графика убывания надежности элемента по экспоненциальному закону с переменной интенсивностью отказа (рис.7), а также в сравнении с нормативным значением, указанным выше в п.3.8.3.

Примечание. Закон функционирования элементов является экспоненциальным с переменной интенсивностью отказа вследствие того, что поток отказов и восстановлений системы является пуассоновским с переменным параметром.

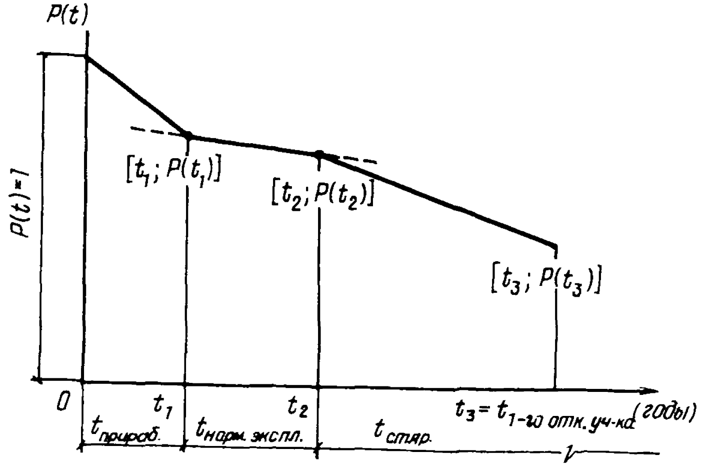

Рис.7. Кривая убыли надежности элемента линейной части до момента первого отказа линейного участка (между соседними КС) в условиях допущения о пуассоновском (с переменным параметром) характере интенсивности отказа элемента

3.8.12. На первом этапе работы трубопровода (в период приработки) вероятность безотказной работы элемента при использовании i -го предельного состояния может быть приближенно выражена через его начальную надежность. Так, для группы однотипных прямолинейных по проекту элементов расчетного участка линейной части по формуле (68) с учетом формулы (66) при использовании i -го предельного состояния начальная вероятность отказа составляет

$$1-P_{0(пр)i}=F_{0(пр)i}=\omega_1 T_0 ,$$

а начальная вероятность отказа одного такого элемента:

$$F_{0э(пр)i}=1-P_{0э(пр)i}=\frac{F_{0(пр)i}}{n}=\frac{\omega_1 T_0}{n} , \qquad (91)$$

откуда

$$\omega_1=\frac{n F_{0э(пр)i}}{T_0} , \qquad (92)$$

где ω_1 – параметр потока отказов указанной группы однотипных элементов;

n – число однотипных элементов в расчетном участке.

Вероятность отказа одного элемента в период приработки с использованием i -го предельного состояния приближенно составит:

$$F_{э(пр)i}\approx\frac{F_{(пр)i}}{n}\approx\frac{\lambda_1 t}{n}\approx\frac{\omega_1 t}{n} ,$$

где $\lambda_1\approx\omega_1$ – с учетом пуассоновского характера потока отказов;

$F_{(пр)i}$ – вероятность отказа группы прямолинейных элементов в период приработки.

Используя соотношение (92), получим

$$F_{э(пр)i}=\frac{t}{T_0}F_{0э(пр)i}=\frac{t}{T_0}(1-P_{0э(пр)i}), \qquad (92а)$$

откуда вероятность безотказной работы одного прямолинейного по проекту элемента в период приработки исходя из i -го предельного состояния приближенно составит

$$P_{э(пр)_i}(t) \approx 1 - \frac{t}{T_0}(1 - P_{0э(пр)_i}). \quad (92б)$$

Эту же вероятность можно приближенно выразить (см.рис.7) из условия

$$P_{э(пр)_i}(t) \approx 1 - \lambda_1 t, \quad (93)$$

при этом интенсивность отказа в период приработки выразится из условия (93) для точки $t = t_1$ (см.рис.7):

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_0}(1 - P_{0э(пр)_i}). \quad (94)$$

3.8.13. На втором этапе работы трубопровода (в период нормальной эксплуатации) вероятность безотказной работы прямолинейного по проекту элемента при использовании i -го предельного состояния (обозначим короче $P_{э(пр)_i}(t) = P_э(t)$ составит (см.рис.7)

$$P_э(t) = K_2 - \lambda_2 t. \quad (95)$$

Из статистики отказов (например, при использовании табл.2) известно отношение интенсивностей отказа в первый и второй периоды работы трубопровода, т.е.

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = m_1,$$

откуда

$$\lambda_2 = m_1 \lambda_1, \quad (96)$$

где m_1 - известный из статистики отказов коэффициент.

Теперь из выражения для $P_э(t)$ в точке $t = t_1$ (рис.7):

$$P_э(t_1) = K_2 - \lambda_2 t_1 = K_2 - m_1 \lambda_1 t_1 \quad (97)$$

легко определить коэффициент K_2 :

$$K_2 = P_э(t_1) + \lambda_2 t_1 = P_э(t_1) + m_1 \lambda_1 t_1 = 1 - \lambda_1 t_1 + m_1 \lambda_1 t_1 . \qquad (98)$$

Затем можно вычислить значение функции $P_э(t)$ в точке $t = t_2$ (см.рис.7):

$$P_э(t_2) = K_2 - \lambda_2 t_2 ,$$

где значения K_2 и λ_2 – по формулам (98), (96).

3.8.14. На третьем этапе работы трубопровода (в период старения) вероятность безотказной работы элемента составит:

$$P_э(t) = K_3 - \lambda_3 t. \qquad (99)$$

Из статистики отказов (например, при использовании табл.2) известно отношение:

$$\frac{\lambda_3}{\lambda_2} = m_2 ,$$

откуда

$$\lambda_3 = m_2 \lambda_2 . \qquad (100)$$

Теперь из выражения (99) для $P_э(t)$ в точке $t = t_2$ (см.рис.7):

$$P_э(t_2) = K_3 - \lambda_3 t_2 = K_3 - m_2 \lambda_2 t_2 \qquad (101)$$

легко определить коэффициент K_3:

$$K_3 = P_э(t_2) + \lambda_3 t_2 = P_э(t_2) + m_2 \lambda_2 t_2 . \qquad (102)$$

Значение функции $P_э(t)$ можно вычислить в точке $t = t_3$ (см.рис.7) первого отказа:

$$P_э(t_3) = P_{э(пр)_i}(t_{1отк}) = K_3 - \lambda_3 t_3 ,$$

где значения K_3 и λ_3 находят по формулам (102), (100).

3.8.15. Окончательно I-е условие безопасности, выраженное через начальную надежность элементов P_0, известные из статистики отказов длительности характерных периодов работы и отношения интенсивностей отказов в эти периоды (при найденном предварительно значении $T_{ср}^{1\text{-го отк}}$ среднего времени работы участка до I-го отказа) будет иметь для элемента при использовании i -го предельного состояния вид

$$P_э(t_{1отк}) = 1 - \lambda_1\left[t_1 - m_1(t_1 - t_2) - m_2(t_2 - t_3)\right] \geq [P_э], \qquad (103)$$

где
$$\lambda_1 = \frac{1}{T_0}\left(1 - P_{оэ(пр)_i}\right);$$
$$m_1 = \frac{\lambda_2^{оп}}{\lambda_1^{оп}}; \qquad m_2 = \frac{\lambda_3^{оп}}{\lambda_1^{оп}};$$

$\lambda_1^{оп}, \lambda_2^{оп}, \lambda_3^{оп}$ – из опыта эксплуатации (по статистике отказов) аналогичных трубопроводов – интенсивности отказов рассматриваемой группы конструктивных элементов в периоды, соответственно приработки, нормальной эксплуатации и старения;

$$t_1 = t_{прираб}; \qquad t_2 = t_{прираб} + t_{норм.экспл};$$
$$t_3 = t_{прираб} + t_{норм.экспл} + \Delta t_{стар} = T_{ср}^{1\text{-го отк}};$$

$P_{оэ(пр)_i} = P_{оэ}$ – начальная надежность элемента (здесь – прямолинейного условного элемента, исходя из i -го предельного состояния).

Формула (103) справедлива для любых типов конструктивных элементов.

3.8.16 Используя данные табл.2 и соотношение (103), найдем, что к моменту I-го отказа расчетного участка линейной части

$$P_{э(ПР)_1}(t) = P_{э(ПР)_2}(t) = P_{э(ПР)_4}(t) \approx 0{,}99941 > [P_э] = 0{,}9986,$$

$$P_{э(ИЗ)_1}(t) = P_{э(ИЗ)_2}(t) = P_{э(ИЗ)_4}(t) \approx 0{,}99939 > [P_э] = 0{,}9986,$$

$$P_{КР_1}(t) = P_{КР_3}(t) = P_{КР_4}(t) \approx 0{,}99985 > [P_э] = 0{,}9986,$$

$$P(t)_{АР} = P(t)_{пер} \approx 1 > [P_э] = 0{,}9986.$$

3.8.17. Для проверки второго условия безопасности вычислим сначала по формуле (68) "эталонный" уровень начальной надежности расчетного участка (используя табл.2):

$$[P_0]_{л.ч} = [K_г^{нач}]_{л.ч} = 1 - T_0 \Sigma (n_i \lambda_i) = 0{,}9995 ,$$

а затем с помощью формулы (66а) вычислим значение P_0, исходя из условий предельных состояний

$P_{0(лч)}$ = 1-157 (1-0,9999998)-288 (1-0,9999998)-432(1-0,9999998)--42 (1-0,9999997)-134(1-0,9999997)-224(1-0,9999997)-200(3 --3.0,9999996) = 1-0,0005= 0,9995 $= [P_0]_{л.ч} = [K_г]_{л.ч}$.

Таким образом, оба условия безопасности эксплуатации линейной части соблюдаются.

Анализ сформулированных выше условий безопасности эксплуатации линейной части показывает, что первое условие при ориентации на $T_{ср}^{1-го\ отк}$ является более легко выполнимым, чем второе условие. Поэтому представляется целесообразным увеличить в первом условии безопасности нормативную наработку элементов. В качестве такой нормативной наработки целесообразно принять не среднюю наработку расчетного участка на 1-й отказ, а экономически целесообразный срок службы трубопровода, составляющий (в зависимости от условий работы), очевидно, 20-30 лет.

4. ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ И УПРУГОИЗОГНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ[x)] ИСХОДЯ ИЗ УСЛОВИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

4.I. Выбор расчетных условий

4.I.I. Оценка начального уровня надежности прямолинейных и упругоизогнутых элементов линейной части предполагается при условии уже осуществленного по СНиП П-45-75 подбора толщины стенки трубопровода.

4.I.2. В качестве условия предельного состояния по прочности при оценке начальной надежности прямолинейных и упругоизогнутых элементов линейной части принимается условие

$$\sigma_{экв} \leq \sigma_{т}, \tag{I04}$$

где $\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение, т.е. такое напряжение, которое должно быть в растянутом элементе, чтобы его состояние было равноопасно с заданным для этого элемента напряженным состоянием [I2];

$\sigma_{т}$ – предел текучести при работе материала на разрыв.

4.I.3. Расчетное эквивалентное напряжение, которое должно сопоставляться с пределом текучести при растяжении, принимается в соответствии с критерием максимальных касательных напряжений (Треска и Сен-Венана):

$$\sigma_{экв} = \sigma_1 - \sigma_3 , \tag{I05}$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения, совпадающие в случае трубчатого сечения с нормальными напряжениями в кольцевом, продольном и радиальном направлениях. Учитывая, что в тон-

---

x) В настоящем разделе для упрощения вычислений будем предполагать, что сварные монтажные соединения равнопрочны основному металлу труб, поэтому специального расчета их начальной надежности не требуется.

костенной трубе последние пренебрежимо малы, а продольные напряжения могут быть как сжимающими, так и растягивающими, эквивалентные напряжения для четырех возможных схем нагружения (рис.8) должны определяться из условий

$$\sigma_{экв} = \sigma_{кц} - 0 = \sigma_{кц}; \qquad \sigma_{экв} = \sigma_{кц} - 0 = \sigma_{кц};$$

$$\sigma_{экв} = \sigma_{кц} - \sigma_{пр}; \qquad \sigma_{экв} = \sigma_{пр} - 0 = \sigma_{пр},$$

где $\sigma_{пр}$ - сжимающее напряжение со знаком минус .

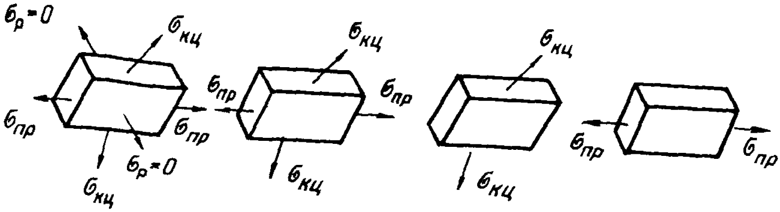

Рис.8. Условия определения эквивалентных напряжений для тонкостенной трубы, нагруженной внутренним давлением и продольной силой

4.1.4. Какое из напряженных состояний, показанных на схемах рис.8, является наиболее опасным, заведомо сказать нельзя. Поэтому учитывая, что 1-е и 3-е состояния равноопасны, необходимо проверять три условия

$$\sigma_{экв} = \sigma_{кц} - \sigma_{пр} \leq \sigma_т ; \qquad (106)$$

$$\sigma_{экв} = \sigma_{кц} \leq \sigma_т ; \qquad (106а)$$

$$\sigma_{экв} = \sigma_{пр} \leq \sigma_T . \qquad (106б)$$

Указанные условия проиллюстрированы на рис.9, где случаи достижения предельного состояния соответствуют прямым

$$\sigma_{кц} - \sigma_{пр} = \sigma_T ; \qquad (107)$$

$$\sigma_{кц} = \sigma_T ; \qquad (107а)$$

$$\sigma_{пр} = \sigma_T . \qquad (107б)$$

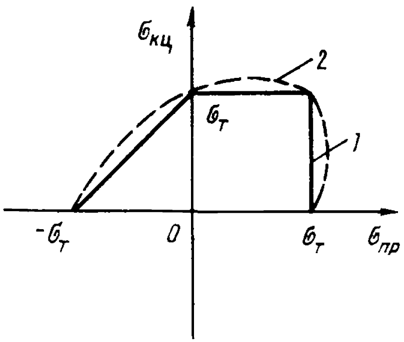

Рис.9. Допустимая область значений эквивалентных напряжений при действии внутреннего давления и продольных сил:
I–по критерию максимальных касательных напряжений; 2–по энергетическому критерию

Безопасному состоянию трубопровода соответствует область значений $\sigma_{экв}$, ограниченная указанными прямыми и осью абсцисс.

4.I.5. Критерий максимальных касательных напряжений при наличии сжимающих продольных напряжений ограничивает эквивалентные напряжения несколько более низкими значениями, чем энергетический критерий Мизеса, используемый в СНиП П-45-75. Максимальное различие в значениях $\sigma_{экв}$ не превышает 13%; на рис.9 оно соответствует удалению элиптической границы энергетического критерия от граничной прямой $\sigma_{кц} - \sigma_{пр} = \sigma_T$ критерия максимальных касательных напряжений в области отрицательных значений $\sigma_{пр}$. Это различие в значениях идет при использовании критерия максимальных касательных напряжений в запас надежности, поэтому, если подбор толщины стенки трубы производился по СНиП П-45-75, то может создаваться впечатление, что оценка надежности с использованием критерия максимальных касательных напряжений даст несколько завышенную "оптимистическую" оценку надежности, что в принципе нежелательно. Однако нормативный расчет толщины стенки трубопровода предусматривает использование значительного по величине общего коэффициента запаса, поэтому связь исходной теоретической гипотезы, принятой в нормативном расчете при подборе сечения с теоретической гипотезой, принятой при вероятностной оценке надежности запроектированной по СНиП П-45-75 трубы, отсутствует, и мы вправе использовать для оценки надежности любую из этих, практически равноценных, гипотез. Решающим аргументом в пользу применения для оценки надежности критерия максимальных касательных напряжений является то, что он дает существенные упрощения вероятностного аппарата при расчете функции надежности.

4.I.6. После оценки начальной надежности по условиям (I07 - I07б) в качестве расчетной оценки по критерию прочности (по I-му предельному состоянию) следует выбирать низшую из трех, поскольку граничным во всех трех случаях является одно и то же значение σ_T.

4.I.7. Основные деформации трубопроводов сосредоточиваются в местах установки компенсаторов и криволинейных вставок (отводов). Поэтому в настоящем разделе, посвященном оценке начальной надежности прямолинейных и упругоизогнутых участков трубопроводов, оценка начальной надежности трубопроводов из условия ограничения их деформаций (перемещений) не рассматривается.

4.I.8. За условие предельного состояния трубопроводов по устойчивости согласно СНиП П-45-55 принимается лишенное коэффициента m соотношение СНиП П-45-75:

$$S \leq N_{кр}, \qquad (108)$$

где S – эквивалентное продольное осевое усилие в сечении трубопровода, определяемое для прямолинейных участков и участков, выполненных упругим изгибом, при отсутствии компенсации продольных перемещений, просадок и пучения грунта по формуле

$$S = (0{,}2\sigma^{н}_{кц} + \alpha E \Delta t)\,F, \qquad (109)$$

F – площадь поперечного сечения стенок трубы;

$N_{кр}$ – продольное критическое усилие, при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода, определяемое по формуле (110);

$\sigma^{н}_{кц}$ – кольцевые напряжения, определяемые с учетом вероятностного подхода от нормативного внутреннего давления.

4.1.9. Критическое продольное усилие для подземных трубопроводов, имеющих выпуклость вверх, определяется по формуле [13]

$$N_{кр} = \frac{5\pi^2 E J}{L^2_{кр}} - \frac{5 C_p L^2_{кр}}{9\pi^2}, \qquad (110)$$

где C_p – коэффициент разгрузки, характеризующий пластическую работу грунта и определяемый по формуле

$$C_p = \frac{q_{пр.гр}}{H_1}, \qquad (111)$$

$$q_{пр.гр} = \gamma'_{гр} D_н (h_0 - 0{,}39 D_н) + \gamma_{гр} h_0^2 \, tg\, 0{,}7\varphi_{гр} + 0{,}7 \frac{C h_0}{\cos 0{,}7\varphi_{гр}}, \qquad (112)$$

$\gamma_{гр}$ – расчетная объемная масса грунта засыпки под трубопроводом;

h_0 – расстояние от верха засыпки до оси трубопровода;

$\varphi_{гр}$ – расчетный угол внутреннего трения грунта;

C – расчетное сцепление грунта;

H_1 – величина, принимаемая при расчете устойчивости в вертикальной плоскости, равной $H_1 = h + D_H$, т.е. расстоянию от поверхности засыпки (в уплотненном состоянии) до низа трубы;

$L_{кр}$ – расчетная длина волны выпучивания, вычисляемая по формуле

$$L_{кр} = \frac{265EJ}{\rho_o q_{пр}\left(1+\sqrt{\dfrac{80EJC_p}{\rho_o^2 \cdot q_{пр}^2}}\right)}, \qquad (113)$$

ρ_o – расчетный радиус изгиба оси трубопровода, принимаемый равным радиусу упругого изгиба оси трубы ρ при выполнении условия

$$L_{кр} \leq 2\rho \sin\frac{\alpha}{2}, \qquad (114)$$

α – угол поворота трубопровода;

$q_{пр}$ – предельное сопротивление поперечным перемещениям трубы, определяемое из условия

$$q_{пр} = q_{п.т} + n_{гр}\, q_{пр.гр},$$

где $n_{гр}$ – коэффициент перегрузки для грунта, принимаемый равным 0,80;

$q_{п.т} = q_{гр} + q_{доп}$;

$q_{гр}$ – масса трубопровода с продуктом без коэффициента перегрузки;

$q_{доп}$ – масса груза или удерживающая способность анкерных устройств.

4.1.10. При оценке надежности линейного участка трубопровода можно допустить, что условие (114) соблюдается всегда, что пойдет в запас надежности, поскольку, если к изогнутому участку примыкают два прямых участка, расчетный радиус изгиба увеличивается, что повышает значение критического продольного усилия $N_{кр}$.

4.2. Оценка начальной надежности по I-му предельному состоянию (по условиям прочности)

4.2.I. В связи с вероятностной постановкой задачи нельзя заранее сказать, подсчитав по формулам (I06-I06б) эквивалентные напряжения, какое из характерных напряженных состояний является более опасным. Поэтому требуется оценка начальной надежности по всем условиям (I06 - I06б), а также дополнительно по условию (I06б), учитывая напряжения от балочного изгиба трубопровода с последующим выбором самого опасного случая, дающего наиболее низкий уровень начальной надежности.

4.2.2. Задача оценки начальной надежности трубного участка согласно п. 3.4.II состоит из двух частей: определение $P_0(0)$, т.е. начальной надежности в точке (сечении) участка условного элемента и определение $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условного уровня начальной надежности участка условного элемента длиной ℓ.

Оценка начальной надежности в кольцевом направлении (при отсутствии продольных осевых сжимающих напряжений)

4.2.3. Определим прежде всего $P_0(0)$. Для этого получим стохастическое условие неразрушимости трубопровода из соотношения (I06а)

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - \tilde{\sigma}_{кц} = \tilde{\sigma}_T - \frac{\tilde{p} D_{вн}}{2\tilde{\delta}} > 0, \qquad (115)$$

где $\tilde{\sigma}_T$ - случайная величина (учитывая ее характеристику в п.3.6.9) предела текучести металла труб;

$\tilde{\sigma}_{кц}$ - случайная величина кольцевых напряжений в сечении условного элемента;

$\tilde{p}$ - случайная величина (учитывая ее характеристику в п.3.6.2) внутреннего давления в магистрали при установившемся режиме эксплуатации;

$\tilde{\delta}$ - случайная величина (учитывая ее характеристику в п.3.6.I0) толщины стенки трубопровода;

$\tilde{U}_0$ - функция запаса (резерва) прочности в точке (сечении) условного элемента трубопровода.

Начальная надежность в точке (сечении) условного элемента трубопровода, исходя из соотношения (II5), выразится вероятностным условием:

$$P_0(0)=P_0(U_0>0)=P\left[\left(\tilde{\sigma}_T-\frac{\tilde{p}\,D_{BH}}{2\tilde{\delta}}\right)>0\right] \qquad (116)$$

4.2.4. Функцию, плотность распределения и числовые характеристики функции запаса прочности $\tilde{U}_0$ в точке (сечении) как случайной величины получим при помощи метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [15-18]. Согласно данному методу каждому набору "разыгрываемых" по правилам разд.5 значений случайных аргументов $\tilde{\sigma}_T, \tilde{\delta}, \tilde{p}$ будет соответствовать одно значение $\tilde{U}_0$, вычисляемое по формуле (115). Повторив процесс разыгрывания случайных аргументов и функции резерва прочности N раз, получим совокупность случайных значений резерва прочности $\tilde{U}_0$, которые по разработанной при создании настоящих Рекомендаций универсальной методике (программе BOOK N8, хранящейся в лаборатории надежности конструкций трубопроводов ВНИИСТа) опишем (предварительно построив гистограмму) кривой распределения Грама-Шарлье (рис.10).

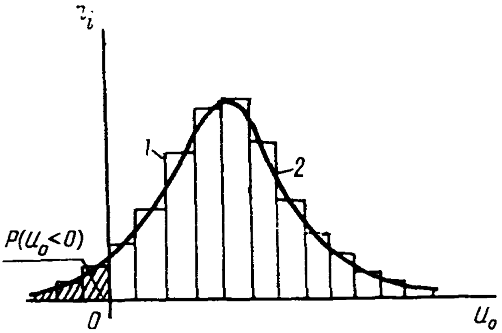

Рис.10. Статистическое описание результатов вычисления (методом Монте-Карло) значений случайной величины U_0 (резерва прочности):

1-ступенчатая гистограмма; 2-плотность распределения (кривая Грама-Шарлье) резерва прочности

4.2.5. Оценку начальной надежности в точке (сечении) условного элемента линейной части трубопровода получим по формуле

$$P_0(0)=1-\int_{-\infty}^{0} p(U_0)\,dU_0, \qquad (117)$$

где $\rho(U_0)$ – плотность распределения резерва прочности (описываемая кривой Грама-Шарлье) в точке (сечении) трубопровода.

Неоднократные проверки показали, что полученное методом статистического моделирования распределение резерва прочности $\tilde{U}_0$ в сечении (точке) является нормальным. Это объясняется тем, что факторы $\tilde{\sigma}_T$, $\tilde{\delta}$ и $\tilde{p}$, рассматриваемые как случайные величины, имеют разброс одного порядка (с учетом того, что значения p рассматриваются для стационарного, установившегося режима), причем коэффициенты вариации этих случайных величин не превышают значения $C_V = 0{,}1$.

4.2.6. Проверку на нормальность полученного методом статистического моделирования распределения случайной величины резерва прочности $\tilde{U}_0$ в сечении трубопровода легко провести, например, путем сравнения получаемых оценок асимметрии и эксцесса с дисперсиями этих оценок для нормальной генеральной совокупности, вычисляемыми как функции от объема выборки по формулам

$$\sigma^2_{q_1} = \frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}; \tag{118}$$

$$\sigma^2_{q_2} = \frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}, \tag{118a}$$

где n – объем выборки.

Если вычисленные оценки асимметрии и эксцесса не превышают соответственно оценок $\sigma^2_{q_1}$ и $\sigma^2_{q_2}$ более чем в 2 раза, считается, что исследуемые выборки взяты из нормальной генеральной совокупности, а полученное распределение является нормальным.

4.2.7. Для нормально распределенной случайной величины $\tilde{U}_0$ оценку начальной надежности в произвольной точке (сечении) трубопровода (оценку начальной надежности в сечении условного элемента) можно получить наряду с формулой (117) по условию

$$P_0(0) = \Phi^*\left(-\frac{\bar{U}_0}{S_u}\right), \tag{119}$$

где $\bar{U}_0$, S_u – соответственно среднее значение (математическое ожидание) и стандарт случайной величины U_0;

Φ^* – табулированная функция нормального распределения [19].

4.2.8. Определим теперь $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условную начальную надежность участка условного элемента длиной ℓ. Для этого, используя тот же критерий (106а), требуется определить вероятность непревышения случайной функцией $\tilde{\tilde{\sigma}}_{кц}$ стохастической границы допустимой области $\sigma_т$.

4.2.9. Граница допустимой области $\sigma_т$ с учетом характеристики фактора прочности в п.3.6.9 является случайной функцией координаты x, т.е. $\tilde{\sigma}_т(x)$, причем значения этой случайной функции(случайной границы) изменяются дискретно при переходе от одной трубы к другой (допуская, что статистический разброс прочностных свойств стали труб в пределах одной трубы пренебрежимо мал).

4.2.10. В отличие от задачи нахождения значения $P_0(0)$, где кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$ были случайной величиной, изменение кольцевых напряжений в сечении участка условного элемента (точнее - в наиболее напряженной точке сечения) при переходе от одного сечения трубопровода к другому требует представления $\sigma_{кц}$ в виде случайной функции по длине (координате x оси) трубопровода, т.е. $\tilde{\sigma}_{кц}(x)$. Это объясняется изменением толщины стенки при переходе от одной трубы к другой. В отличие от случайной функции $\tilde{\tilde{\sigma}}_т(x)$, принимающей для каждой трубы одно единственное значение, случайная функция $\tilde{\tilde{\sigma}}_{кц}(x)$ для каждой трубы имеет множество значений, учитывая статистическую изменчивость внутреннего давления p. Случайную величину $\tilde{\sigma}_{кц}$ в пределах одной трубы можно получить, зафиксировав одно случайное значение δ, на основе информации о случайной величине $\tilde{p}$

$$(\sigma_{кц}) = \frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{2\delta}, \tag{120}$$

где $\tilde{p}$ - случайная величина внутреннего давления;

δ - детерминированная величина, взятая случайным образом из совокупности значений случайной величины толщины стенки трубопровода.

4.2.11. Стохастическое условие неразрушения при определении $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условной начальной надежности участка условного элемента, будет иметь вид

$$\tilde{\tilde{\tilde{\sigma}}}_{кц}(x) < \tilde{\tilde{\sigma}}_т(x), \tag{121}$$

где x - текущая координата оси трубопровода.

Для каждой трубы это условие имеет более простой вид:

$$\tilde{\sigma}_{кц} < \sigma_т, \tag{122}$$

где $\sigma_т$ – детерминированное значение, выбираемое случайным образом из совокупности значений случайной функции $\tilde{\sigma}_т(x)$;

$\tilde{\sigma}_{кц}$ – случайная величина кольцевых напряжений, вычисляемая по формуле (120).

Определив при фиксированном значении $\sigma_т$ вероятность непревышения кольцевыми напряжениями предела текучести на одной трубе, т.е. вероятность

$$P_0(\ell/\Omega)_i = P[(\sigma_т - \tilde{\sigma}_{кц}) > 0], \tag{123}$$

повторим указанную выше процедуру определения $P_0(\ell/\Omega)_i$ столько раз, сколько труб включает в себя условный элемент, выбирая каждый раз случайным образом значение $\sigma_т$, т.е. границу допустимой области.

4.2.12. Вероятность $P_0(\ell/\Omega)_i$ для одной трубы легко определяется из условия

$$P_0(\ell/\Omega)_i = 1 - \int_{-\infty}^{0} f(U_1)\,dU_1. \tag{124}$$

В соотношении (124) $f(U_1)$ – плотность распределения случайной величины U_1, равной

$$\tilde{U}_1 = \sigma_т - \frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{2\delta}, \tag{125}$$

где $\sigma_т$ и δ – детерминированные величины, взятые (для одной трубы) случайным образом из совокупностей соответствующих случайных величин $\tilde{\sigma}_т$ и $\tilde{\delta}$.

4.2.13. Плотность распределения $f(U_1)$ получаем путем моделирования методом статистических испытаний в процессе моделирования плотности распределения функции (115). Отсюда же получаем и условную начальную вероятность отказа

$$Q_0(\ell/\Omega)_i = \int_{-\infty}^{0} f(U_1)\,dU_1, \tag{126}$$

которую используем для вычисления $P_0(\ell/\Omega)_i$ в соотношении (I24).

При нормальном распределении случайной величины внутреннего давления $\tilde{P}$ распределение $\tilde{U}_1$ также будет нормальным в связи с линейностью функции (I25), что позволит, как в п.4.2.7, определить непосредственно значение $P_0(\ell/\Omega)_i$ по среднему значению и стандарту функции U_1.

4.2.I4. Разыгрывая случайные величины $\tilde{\sigma}_T$ и $\tilde{\delta}$ и выбирая каждый раз случайным образом (см правила разд.5) по одному значению σ_T и δ', определим n значений $P_0(\ell/\Omega)_i$ (где n – число труб в протяженном условном элементе).

Безусловную начальную надежность участка условного протяженного элемента в кольцевом направлении определим по формуле, приведенной в п.3.4.II. Надежность условного элемента в целом вычислим в соответствии с пп.3.5.7- 3.5.9,используя при объединении элементов соотношение

$$P_{0(э)} = P_{0i} P_{0j} + \varphi \sqrt{P_{0i}(1-P_{0i})P_{0j}(1-P_{0j})} \quad (I27)$$

Оценка начальной надежности в продольном направлении

4.2.I5. Определим прежде всего $P_0(0)$. Стохастическое условие неразрушимости трубопровода в соответствии с критерием (I06б) будет иметь вид

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - \tilde{\sigma}_{прN} = \left(\tilde{\sigma}_T - \left| -\alpha E \Delta\tilde{t} + 0{,}25 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\tilde{\delta}} \right|\right) > 0, \quad (I28)$$

где $\Delta\tilde{t}$ – случайная величина температурного перепада (принимаемого положительным при нагревании) при установившемся режиме эксплуатации;

$\tilde{U}_0$ – функция запаса (резерва) прочности в точке (сечении) условного элемента трубопровода;

$\tilde{\sigma}_{прN}$ – случайная величина продольных напряжений (без учета изгиба) в сечении условного элемента.

4.2.16. Начальную надежность в точке (сечении) условного элемента трубопровода с учетом выражения (128) будем вычислять с использованием вероятностного условия

$$P_0(0) = P(U_0 > 0) = P\left[\left(\tilde{\sigma}_T - \left| -\alpha E \Delta \tilde{t} + 0{,}25 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\tilde{\delta}} \right|\right) > 0\right]. \quad (129)$$

4.2.17. Функцию, плотность распределения и числовые характеристики случайной величины запаса прочности $\tilde{U}_0$ в точке (сечении) получим, как и в п.4.2.4, методом статистических испытаний, разыгрывая наборы значений указанных выше случайных величин, в том числе $\Delta\tilde{t}$, и аппроксимируя полученную совокупность значений $\tilde{U}_{0i}$ кривой Грама-Шарлье.

4.2.18. Оценку начальной надежности в точке (сечении) условного элемента линейной части получим по формуле (117) или при нормальном распределении $\tilde{U}_0$ – по формуле (119).

4.2.19. Найдем теперь $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условную начальную надежность участка условного элемента длиной ℓ. Для этого, используя тот же критерий неразрушимости (106б), требуется определить вероятность непревышения случайной функцией $\tilde{\sigma}_{прN}$ стохастической границы допустимой области $\tilde{\tilde{\sigma}}_T$, или учитывая дискретный характер этих случайных функций,– вероятности непревышения случайной величиной $\tilde{\sigma}_{прN}$ дискретных случайных значений σ_T на всех участках по длине условного элемента.

4.2.20. Стохастическое условие неразрушения при определении $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условной начальной надежности условного элемента будет иметь вид

$$\tilde{\tilde{\sigma}}_{прN}(x) < \tilde{\tilde{\sigma}}_T(x), \quad (130)$$

где x – текущая координата оси трубопровода.

Для каждой трубы это условие имеет более простой вид

$$\tilde{\sigma}_{прN} < \sigma_T, \quad (131)$$

где σ_T – то же, что в формуле (122);

$\tilde{\sigma}_{прN}$– случайная величина продольных напряжений, вычисляемая по формуле

$$\tilde{\sigma}_{прN} = -\alpha E \Delta\tilde{t} + 0{,}25\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta}, \qquad (132)$$

где $\Delta\tilde{t}$ и $\tilde{p}$ – случайные величины соответственно температурного перепада и внутреннего давления;

δ – детерминированная величина, взятая случайным образом из совокупности значений случайной величины толщины стенки трубопровода $\tilde{\delta}$.

4.2.21. Определив при фиксированном значении σ_T вероятность непревышения продольными напряжениями предела текучести на одной трубе, т.е. вероятность

$$P_0(\ell/\Omega)_i = P[(\sigma_T - \tilde{\sigma}_{прN}) > 0], \qquad (133)$$

повторим указанную выше процедуру определения $P_0(\ell/\Omega)_i$ столько раз, сколько труб включает в себя условный элемент, выбирая каждый раз случайным образом значение σ_T, т.е. границу допустимой области.

4.2.22. Вероятность $P_0(\ell/\Omega)_i$ для одной трубы легко определяется по формуле

$$P_0(\ell/\Omega)_i = 1 - \int_{-\infty}^{0} f(U_2)\,dU_2, \qquad (134)$$

где $f(U_2)$ – плотность распределения случайной величины U_2, равной

$$U_2 = \sigma_T - \left| -\alpha E \Delta\tilde{t} + 0{,}25\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta} \right|, \qquad (135)$$

σ_T и δ – детерминированные величины, взятые (для одной трубы) случайным образом из совокупностей соответствующих случайных величин $\tilde{\sigma}_T$ и $\tilde{\delta}$.

4.2.23. Плотность распределения $f(U_2)$ получаем путем моделирования методом статистических испытаний в процессе моделирования плотности распределения функции (128). Отсюда же получаем и условную начальную вероятность отказа

$$Q_0(\ell/\Omega)_i = \int_{-\infty}^{0} f(U_2)\,dU_2, \qquad (136)$$

которую используем для вычисления $P_0(\ell/\Omega)_i$ в соотношении (134).

При нормальном распределении случайных величин $\Delta\tilde{t}$ и $\tilde{\rho}$ распределение $\tilde{U}_2$ также будет нормальным в связи с линейностью функции (135), что позволит, как в п.4.2.7, определить непосредственно значение $P_0(\ell/\Omega)_i$ по среднему значению и стандарту функции U_2.

4.2.24. Разыгрывая случайные величины (по правилам разд.5) $\tilde{\sigma}_T$ и $\tilde{\delta}$ и выбирая каждый раз случайным образом по одному значению σ_T и δ, определим n значений $P_0(\ell/\Omega)_i$, где n – число труб в протяженном условном элементе.

Безусловную начальную надежность участка условного протяженного элемента при его работе в продольном направлении определим по формуле (69), приведенной в п.3.4.11. Надежность (начальную) условного элемента в целом вычисляем в соответствии с пп.3.5.7-3.5.9, используя формулу (127).

Оценка начальной надежности в продольном направлении с учетом изгиба

4.2.25. Определим, как обычно, сначала $P_0(0)$. Стохастическое условие неразрушимости трубопровода в соответствии с критерием (106б) будет иметь вид

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - \tilde{\sigma}_{пр} = \tilde{\sigma}_T - \left| 0{,}15\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\tilde{\delta}} - \alpha E \Delta\tilde{t} \pm \frac{E D_н}{2\tilde{\rho}} \right|, \qquad (137)$$

где $\tilde{\sigma}_T, \tilde{p}, \tilde{\delta}, \Delta\tilde{t}$ – обозначения те же, что в формуле (128);

$\tilde{\rho}$ – случайная величина радиуса упругого изгиба оси трубопровода;

$\tilde{\sigma}_{пр}$ – случайная величина продольных напряжений с учетом изгиба в сечении условного элемента (точнее – в наиболее напряженной точке сечения).

4.2.26. Начальная надежность в точке (сечении) условного элемента трубопровода, исходя из выражения (137), будет вычисляться по вероятностному соотношению

$$P_0(0)=P(U_0>0)=P\{[\tilde{\sigma}_T-|0{,}15\frac{\tilde{p}D_{вн}}{\tilde{\delta}}-\alpha E\Delta\tilde{t}\pm\frac{ED_н}{2\tilde{\rho}}|]>0\}. \quad (138)$$

4.2.27. Функцию, плотность распределения и числовые характеристики случайной величины запаса прочности $\tilde{U}_0$ в точке (сечении) получим методом статистических испытаний, разыгрывая наборы значений указанных выше случайных величин, в том числе $\Delta\tilde{t}$, и аппроксимируя полученную совокупность значений $\tilde{U}_{0i}$ кривой Грама-Шарлье. Для данного случая, как наиболее трудоемкого в вычислительном отношении, в процессе создания настоящих Рекомендаций разработана программа машинного расчета (программа "Монте-Карло"), хранящаяся в фонде ЛММИ (лаборатории математических методов исследования) ВНИИСТа [15].

4.2.28. Оценку начальной надежности в точке (сечении) условного элемента линейной части получим по формуле (117) или (при нормальном распределении $\tilde{U}_0$) - по формуле (119).

4.2.29. На втором этапе решения задачи определим $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условную начальную надежность участка условного элемента длиной ℓ. Для этого, как и в предыдущем случае, требуется определить вероятность непревышения случайной функцией $\tilde{\tilde{\sigma}}_{пр}$ стохастической границы допустимой области $\tilde{\tilde{\sigma}}_T$.

4.2.30. Стохастическое условие неразрушения при определении $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условной начальной надежности условного элемента будет иметь вид

$$\tilde{\tilde{\sigma}}_{пр}(x)<\tilde{\tilde{\sigma}}_T(x), \quad (139)$$

где $\tilde{\tilde{\sigma}}_{пр}(x)$ - случайная по длине трубопровода функция продольных напряжений с учетом изгиба;

x - текущая координата оси трубопровода.

4.2.31. Чтобы перейти к более простой дискретной схеме расчета, введем допущение о том, что радиус упругого изгиба оси трубопровода в пределах длины одной трубы (10-12 м) не изменяется, что вполне соответствует представлению о плавном изменении радиусов упругого изгиба трубопроводов большого диаметра. Тогда для каждой трубы, как и в случае, рассмотренном выше, условие (139) будет иметь более простой вид

$$\tilde{\sigma}_{пр}<\sigma_T, \quad (140)$$

где σ_T – то же, что в формулах (I22), (I31);

$\tilde{\sigma}_{пр}$ – случайная величина продольных напряжений с учетом изгиба, вычисляемая по формуле

$$\tilde{\sigma}_{пр} = 0{,}15\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta\tilde{t} \pm \frac{E D_н}{2\rho}, \tag{I41}$$

где $\tilde{p}, \Delta\tilde{t}$ – случайные величины соответственно внутреннего давления, температурного перепада;

ρ – детерминированная величина радиуса упругого изгиба трубопровода.

Примечание. Фактор ρ может вводиться в соотношение (I41) также через кривизну оси трубопровода $K = 1/\rho$, если исходная информация об этом факторе присутствует в виде данных о кривизне;

$\hat{\delta}$ – по-прежнему детерминированная величина толщины стенки трубы, взятая случайным образом из совокупности значений случайной величины толщины стенки трубопровода $\tilde{\delta}$.

4.2.32. Определив при фиксированных значениях σ_T, δ и ρ вероятность непревышения предела текучести продольными напряжениями (с учетом изгиба) на одной трубе, т.е. вероятность

$$P_0(\ell/\Omega)_i = P\left[(\sigma_T - \tilde{\sigma}_{пр}) > 0\right], \tag{I42}$$

повторим указанную выше процедуру определения $P_0(\ell/\Omega)_i$ столько раз, сколько труб включает в себя условный элемент, выбирая каждый раз случайным образом значение σ_T, т.е. границу допустимой области, а также значения δ и ρ.

4.2.33. Вероятность $P_0(\ell/\Omega)_i$ для одной трубы определяется по формуле

$$P_0(\ell/\Omega)_i = 1 - \int_{-\infty}^{0} f(U_3)\,dU_3. \tag{I43}$$

где $f(U_3)$ – плотность распределения случайной величины U_3, равной

$$U_3 = \sigma_T - \left|0{,}15\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta\tilde{t} \pm \frac{E D_н}{2\rho}\right|, \tag{I44}$$

где σ_T, δ, ρ – детерминированные величины, взятые (для одной трубы) случайным образом из совокуп – ностей соответствующих случайных величин $\tilde{\sigma}_T, \tilde{\delta}$ и $\tilde{\rho}$.

4.2.34. Плотность распределения $f(U_3)$ получаем путем моделирования методом статистических испытаний (в процессе моделирования плотности распределения функции (I37). Отсюда же получаем и условную начальную вероятность отказа

$$Q_0(\ell/\Omega)_i = \int_{-\infty}^{0} f(U_3)\,dU_3, \qquad (I45)$$

которую используем для вычисления $P_0(\ell/\Omega)_i$ в соотношении (I43).

4.2.35. При нормальном распределении случайных величин $\tilde{\rho}, \Delta\tilde{t}$ и $\tilde{K} = \frac{1}{\tilde{\rho}}$ распределение $\tilde{U}_3$ также будет нормальным в связи с линейностью функции (I44), что позволит, как в п.4.2.7, определить непосредственно значение $P_0(\ell/\Omega)_i$ по среднему значению и стандарту функции U_3:

$$\bar{U}_3 = \sigma_T - \left| 0{,}15 \frac{\bar{\rho}\mathcal{D}_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta\bar{t} \pm \frac{E\mathcal{D}_н}{2}\bar{K} \right|;$$

$$S_{U_3} = \sqrt{\mathcal{D}_{U_3}} = \sqrt{\left(0{,}15\frac{\mathcal{D}_{вн}}{\delta}\right)^2 \mathcal{D}_\rho + \alpha^2 E^2 \mathcal{D}_{\Delta t} + \frac{E^2\mathcal{D}_н^2}{4}\mathcal{D}_K}.$$

4.2.36. Разыгрывая случайные величины (по правилам разд.5) $\tilde{\sigma}_T, \tilde{\rho}, \tilde{\delta}$ и выбирая каждый раз случайным образом по одному значению $\sigma_T, \tilde{\rho}, \delta$, определим n значений $P_0(\ell/\Omega)_i$, где n – по-прежнему число труб в протяженном условном элементе.

Безусловную начальную надежность участка условного протяженного элемента при его работе в продольном направлении с учетом изгиба определим по формуле (69), приведенной в п.3.4.II. Надежность (начальную) условного элемента в целом вычисляем в соответствии с пп.3.5.7-3.5.9, используя формулу (I27).

Оценка начальной надежности исходя из условия

$$\sigma_{экв} = (\sigma_{кц} - \sigma_{пр}) \leq \sigma_T.$$

4.2.37. Определим прежде всего $P_0(0)$. Стохастическое условие неразрушимости трубопровода в соответствии с критерием (I06) должно иметь вид

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - (\tilde{\sigma}_{кц} - \tilde{\sigma}_{прN}) = \tilde{\sigma}_T - \frac{\tilde{p} D_{вн}}{2\delta} + \left| -\alpha E \Delta \tilde{t} + 0{,}25 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\delta} \right|. \quad (I46)$$

Для уменьшения числа случайных переменных в выражении (I46) целесообразно перейти к рассмотрению двух возможных случаев:

когда суммарные продольные напряжения сжимающие и условие (I46) приобретает вид

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - 0{,}25 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta \tilde{t}; \quad (I47)$$

когда суммарные продольные напряжения растягивающие и условие (I46) приобретает вид

$$\tilde{U}_0 = \tilde{\sigma}_T - 0{,}75 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\delta} + \alpha E \Delta \tilde{t}. \quad (I48)$$

4.2.38. При оценке начальной надежности линейной части конкретного трубопровода характер суммарных продольных напряжений можно установить детерминированным расчетом, а следовательно, и выбрать из двух условий (I47), (I48) расчетное.

4.2.39. Начальная надежность в точке (сечении) условного элемента линейной части трубопровода, исходя из выражений (I47), (I48), будет вычисляться на основании одного из вероятностных соотношений:

$$P_0(0) = P(U_0 > 0) = P\left[\left(\tilde{\sigma}_T - 0{,}25 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta \tilde{t}\right) > 0\right]; \quad (I49)$$

$$P_0(0) = P(U_0 > 0) = P\left[\left(\tilde{\sigma}_T - 0{,}75 \frac{\tilde{p} D_{вн}}{\delta} + \alpha E \Delta \tilde{t}\right) > 0\right] \quad (I50)$$

4.2.40. Функцию, плотность распределения и числовые характеристики случайной величины запаса прочности $\tilde{U}_0$ в точке (сечении) получим, как и ранее, методом статистических испытаний, разыгрывая наборы значений указанных выше случайных величин и аппроксимируя полученную совокупность значений $\tilde{U}_{0i}$ кривой Грама-Шарлье.

4.2.41. Оценку начальной надежности в точке (сечении) условного элемента линейной части получим по формуле (117) или при нормальном распределении $\tilde{U}_{0i}$ – по формуле (119).

4.2.42. Теперь следует определить $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условную начальную надежность участка условного элемента длиной ℓ. Для этого, используя критерий неразрушимости (106), определяем вероятность непревышения случайной функцией $\tilde{\tilde{\sigma}}_{экв} = \tilde{\tilde{\sigma}}_{кц} - \tilde{\tilde{\sigma}}_{пр\,N}$ стохастической границы допустимой области $\sigma_т$ или, учитывая дискретный характер этих случайных функций,– вероятности непревышения случайной величиной $\sigma_{экв}$ дискретных случайных значений $\sigma_т$ на всех участках по длине условного элемента.

4.2.43. Стохастическое условие неразрушения при определении $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условной начальной надежности участка условного элемента, будет иметь вид

$$\tilde{\tilde{\sigma}}_{экв}=[\tilde{\tilde{\sigma}}_{кц}(x)-\tilde{\tilde{\sigma}}_{пр\,N}(x)]<\tilde{\tilde{\sigma}}_т(x), \tag{151}$$

где $\tilde{\tilde{\sigma}}_{экв}$ – случайная функция эквивалентного напряжения;

x – текущая координата оси трубопровода.

Для каждой трубы это условие имеет более простой вид:

$$\tilde{\sigma}_{экв}=(\tilde{\sigma}_{кц}-\tilde{\sigma}_{пр\,N})<\sigma_т, \tag{152}$$

где $\tilde{\sigma}_{экв}$ – случайная величина эквивалентных напряжений, вычисляемая по одной из формул:

$$\tilde{\sigma}_{экв}=0{,}25\frac{\tilde{p}D_{вн}}{\delta}+\alpha E\widetilde{\Delta t}; \tag{153}$$

$$\tilde{\sigma}_{экв}=0{,}75\frac{\tilde{p}D_{вн}}{\delta}-\alpha E\widetilde{\Delta t}. \tag{154}$$

В формулах (153), (154) $\tilde{p}$, $\widetilde{\Delta t}$, δ обозначения те же, что в формуле (132).

4.2.44. Определив при фиксированном значении $\sigma_т$ вероятность непревышения продольными напряжениями предела текучести на одной трубе, т.е. вероятность

$$P_0(\ell/\Omega)_i = P[(\sigma_T - \tilde{\sigma}_{экв}) > 0], \tag{155}$$

повторим указанную выше процедуру определения значений $P_0(\ell/\Omega)_i$ столько раз, сколько труб включает в себя условный элемент, выбирая каждый раз случайным образом значение σ_T, т.е. границу допустимой области.

4.2.45. Вероятность $P_0(\ell/\Omega)_i$ для одной трубы легко определяется по формуле

$$P_0(\ell/\Omega)_i = 1 - \int_{-\infty}^{0} f(U_4)\,dU_4. \tag{156}$$

В формуле (156) $f(U_4)$ – плотность распределения случайной величины U_4, вычисляемой по одному из условий:

$$\tilde{U}_4 = \sigma_T - 0{,}25\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta} - \alpha E \widetilde{\Delta t}; \tag{157}$$

$$\tilde{U}_4 = \sigma_T - 0{,}75\,\frac{\tilde{p}\,D_{вн}}{\delta} + \alpha E \widetilde{\Delta t}, \tag{158}$$

где σ_T и δ – детерминированные величины, взятые (для одной трубы) случайным образом из совокупностей соответствующих случайных величин $\tilde{\sigma}_T$ и $\tilde{\delta}$.

4.2.46. Плотность распределения $f(U_4)$ получаем путем моделирования методом статистических испытаний в процессе моделирования плотности распределения функций (147), (148). Отсюда же получаем и условную начальную вероятность отказа

$$Q_0(\ell/\Omega)_i = \int_{-\infty}^{0} f(U_4)\,dU_4, \tag{159}$$

которую используем для вычисления $P_0(\ell/\Omega)_i$ в соотношении (156).

4.2.47. При нормальном распределении случайных величин $\tilde{p}$ и Δt распределение U_4 также будет нормальным в связи с линейностью функций (157), (158), что позволит, как и в п.4.2.7, определить значение $P_0(\ell/\Omega)_i$ по среднему значению и стандарту функции U_4.

4.2.48. Разыгрывая случайные величины $\tilde{\sigma}_T$ и $\tilde{\delta}$ (по правилам разд.5) и выбирая каждый раз случайным образом по одному значению σ_T и δ, определим n значений $P_0(\ell/\Omega)_i$, где n – число труб в протяженном условном элементе.

Безусловную начальную надежность участка условного протяженного элемента по критерию $\sigma_{экв}=(\sigma_{кц}-\sigma_{пр})\leq\sigma_T$ определим по формуле (69), представленной в п.3.4.II. Начальную надежность условного элемента в целом вычисляем в соответствии с пп. 3.5.7–3.5.9, используя формулу (I27).

4.2.49. Из полученных по критериям прочности оценок начальной надежности условного протяженного элемента линейной части в качестве расчетной выбирается наинизшая.

4.3. Оценка начальной надежности по 2-му предельному состоянию (условию устойчивости)

4.3.I. Используем условие неразрушимости (I08), представив его в виде

$$U_0=N_{кр}-S>0, \tag{I60}$$

иначе

$$U_0=\left(\frac{5\pi^2EJ}{L^2_{кр}}-\frac{5C_pL^2_{кр}}{9\pi^2}\right)-(0{,}2\sigma^н_{кц}+\alpha E\Delta t)F, \tag{I6I}$$

где U_0 – функция запаса начальной устойчивости.

4.3.2. Подставляя в условие (I60) выражения: для случайных величин $L_{кр}$ (II4), C_p (III) и $\sigma_{кц}$, приходим к следующему виду стохастического условия сохранения начальной устойчивости (I6I):

$$U_0=0{,}1885\pi^2\tilde{p}(\tilde{q}_{пт}+\tilde{q}_{пр.тр})\left(1+\sqrt{1+\frac{80EJ\tilde{q}_{пр.гр}}{(\tilde{h}+D_н)\tilde{p}^2(\tilde{q}_{пт}+\tilde{q}_{пр.гр})^2}}\right)-$$

$$-\frac{1325\tilde{q}_{пр.гр}EJ}{(\tilde{h}+D_н)\pi^2\tilde{p}(\tilde{q}_{пт}+\tilde{q}_{пр.гр})\left(1+\sqrt{1+\frac{80EJ\tilde{q}_{пр.гр}}{(\tilde{h}+D)\tilde{p}^2(\tilde{q}_{пт}+\tilde{q}_{пр.гр})^2}}\right)}-$$

$$-\frac{\tilde{p}D_{вн}\tilde{F}}{10\tilde{\delta}}-\alpha E\Delta\tilde{t}\tilde{F}, \tag{I62}$$

где $\tilde{h}, \tilde{\rho}, \tilde{\delta}$ – случайные величины (аргументы функции U);

$\tilde{q}_{пт}$ – случайная величина, равная $\tilde{q}_{пт} = q_{тр} + \tilde{q}_{доп}$;

$q_{тр}$ – детерминированная величина;

$\tilde{q}_{доп}$ – случайная величина;

$\gamma_{гр}, \varphi_{гр}, C$ – принимаются здесь, как и при детерминистическом подходе, неслучайными величинами (при наличии соответствующей статистической информации изменчивость этих факторов легко учесть);

$\tilde{q}_{пр.гр}$ – случайная величина, зависящая от $\tilde{h}$ по формуле (III), в которой $\tilde{h}_0 = (\tilde{h} + 0{,}5 D_н)$, т.е.

$$\tilde{q}_{пр.гр} = \gamma_{гр} D_н (\tilde{h} + 0{,}11 D_н) + \gamma_{гр} (\tilde{h} + 0{,}5 D_н)^2 \times$$
$$\times \operatorname{tg} 0{,}7\varphi_{гр} + \frac{0{,}7 C (\tilde{h} + 0{,}5 D_н)}{\cos 0{,}7 \varphi_{гр}},$$

$\tilde{p}, \Delta\tilde{t}$ – случайные величины (внутреннего давления и температурного перепада).

4.3.3. Если допустить, что потеря устойчивости возможна в каждом сечении условного элемента (что пойдет "в запас надежности", поскольку это явление характерно только для выпуклых участков трубопровода), то подход к оценке начальной вероятности потери устойчивости условным протяженным элементом может быть прежним, т.е. характеризоваться соотношением (69). Поэтому, как и ранее, найдем сначала $P_0(0)$.

4.3.4. Начальная надежность в точке (сечении) условного элемента трубопровода по критерию устойчивости исходя из выражения (162) будет вычисляться по вероятностному соотношению

$$P_0(0) = P(U_0 > 0) = P[(N_{кр} - S) > 0] = P\{[0{,}1885 \pi^2 \tilde{\rho} (\tilde{q}_{п.т} +$$
$$+ \tilde{q}_{пр.гр})(1 + \sqrt{1 + \frac{80 EJ \tilde{q}_{пр.гр}}{(\tilde{h} + D_н) \tilde{\rho}^2 (\tilde{q}_{п.т} + \tilde{q}_{пр.гр})^2}}) -$$

$$- \frac{1325\,\tilde{q}_{пр.гр.}\,EJ}{(\tilde{h}+D_н)\pi^2\tilde{\rho}(\tilde{q}_{п.т}+\tilde{q}_{пр.гр})\left(1+\sqrt{1+\frac{80EJ\tilde{q}_{пр.гр.}}{(\tilde{h}+D)\tilde{\rho}^2(\tilde{q}_{п.т}+\tilde{q}_{пр.гр})^2}}\right)} -$$

$$- \frac{\tilde{\rho}\, D_{вн} F}{10\tilde{\delta}} - \alpha E \Delta\tilde{t}\tilde{F}\Big] > 0\Big\}. \tag{163}$$

4.3.5. Функцию, плотность распределения и числовые характеристики случайной величины запаса устойчивости $\tilde{U}_0$ в точке (сечении) получим методом статистических испытаний, разыгрывая наборы значений указанных выше случайных величин и аппроксимируя полученную совокупность значений $\tilde{U}_{0i}$ кривой Грама-Шарлье.

4.3.6. Оценку начальной надежности в точке (сечении) условного элемента линейной части по условию устойчивости получим по формуле (117) или (при нормальном распределении $\tilde{U}_0$) по формуле (119).

4.3.7. На втором этапе определим $P_0(\ell/\Omega)$, т.е. условную начальную надежность условного элемента длиной ℓ по критерию устойчивости. Для этого требуется определить вероятность непревышения случайной функцией эквивалентного продольного осевого усилия $\tilde{\tilde{S}}$ стохастической границы допустимой области $\tilde{\tilde{N}}_{кр}$ (продольного критического усилия). Это стохастическое условие неразрушения при определении $P_0(\ell/\Omega)$ будет иметь вид

$$\tilde{\tilde{S}}_{кр}(x) < \tilde{\tilde{N}}_{кр}(x), \tag{164}$$

где $\tilde{\tilde{S}}_{кр}(x)$ – случайная по длине трубопровода функция эквивалентного продольного осевого усилия;

$\tilde{\tilde{N}}_{кр}(x)$ – случайное по длине трубопровода продольное критическое усилие;

x – текущая координата оси трубопровода.

4.3.8. Чтобы перейти к более простой дискретной схеме расчета, введем прежнее допущение о том, что в пределах длины одной трубы (10-12 м) величины $\rho, h, \delta, q_{доп}$ не изменяются . Тогда для каждой трубы условие (164) будет иметь более простой вид:

$$\tilde{S} < N_{кр}, \tag{164а}$$

где $N_{кр}$ – детерминированное значение критического усилия, выбираемое случайным образом из совокупности случайных значений $\tilde{N}$, вычисляемых методом Монте-Карло при расчете функции P_0 (0) по условию (163);

$\tilde{S}$ – случайная величина эквивалентного продольного осевого усилия.

4.3.9. Определив при фиксированном значении $N_{кр}$ вероятность непревышения случайной величиной $\tilde{S}$ граничного значения, т.е. вероятность

$$P_0(\ell/\Omega)_i = P[(N_{кр} - \tilde{S}) > 0],$$

повторим указанную процедуру определения $P_0(\ell/\Omega)_i$ столько раз, сколько труб включает в себя условный элемент, выбирая каждый раз случайным образом значение $N_{кр}$, т.е. границу допустимой области.

4.3.10. Вероятность $P_0(\ell/\Omega)_i$ для одной трубы определяется по формуле

$$P_0(\ell/\Omega)_i = 1 - \int_{-\infty}^{0} f(U_5)\,dU_5, \tag{165}$$

где $f(U_5)$ – плотность распределения случайной величины $\tilde{U}_5$, равной

$$U_5 = N_{кр} - \tilde{S} = 0{,}1885\pi^2 p\,(q_{п.т} + q_{пр.гр})(1 + \\ + \sqrt{1 + \frac{80EJ\,q_{пр.гр}}{(h + D_н)p^2(q_{пт} + q_{пр.гр})^2}}\,) -$$

$$
\cdot \frac{1325\, q_{пр.гр} EJ}{(h+D_н)\pi^2 p(q_{п.т}+q_{пр.гр})\left(1+\sqrt{1+\frac{80EJq_{пр.гр}}{(h+D)p^2(q_{п.т}+q_{пр.гр})^2}}\right)} -
$$

$$
-\frac{\tilde{p} D_{вн} F}{10\delta} - \alpha E \widetilde{\Delta t} F. \qquad (166)
$$

В соотношение (166) как случайные величины входят только факторы $\tilde{p}$ и $\widetilde{\Delta t}$, а все другие величины - детерминированные, выбираемые случайным образом из совокупностей соответствующих случайных величин.

4.3.11. Плотность распределения $f(U_5)$ получаем путем моделирования методом статистических испытаний в процессе моделирования плотности распределения функции (162). Отсюда же получаем и условную начальную вероятность отказа

$$
Q_0(\ell/\Omega)_i = \int_{-\infty}^{0} f(U_5)\,dU_5,
$$

которую используем для вычисления $P_0(\ell/\Omega)_i$ в соотношении (165).

4.3.12. При нормальном распределении случайных величин $\widetilde{\Delta t}$ и $\tilde{p}$ распределение $\tilde{U}_5$ также будет нормальным в связи с линейностью функции (166), что позволит, как в п.4.2.7, определить непосредственно значение $P_0(\ell/\Omega)_i$ по среднему значению и стандарту функции U_5.

4.3.13. Разыгрывая случайные величины (по правилам разд.5) $\tilde{h}, \tilde{p}, \tilde{\delta}, \tilde{q}_{доп}$ и выбирая каждый раз случайным образом по одному значению этих величин, определим n значений $P_0(\ell/\Omega)_i$ где n - число труб в протяженном условном элементе.

Безусловную начальную надежность участка условного протяженного элемента, исходя из условия потери устойчивости, определим по формуле (69) в п.3.4.11. Начальную надежность условного элемента в целом вычисляем в соответствии с пп.3.5.7-3.5.9, используя формулу (127).

4.4. <u>Статистическая оценка равнопрочности монтажных сварных соединений трубопроводов и основного металла труб</u>

4.4.I. Записанное в СНиП П-45-75 требование равнопрочности сварных соединений и основного металла труб справедливо трактовать как требование равной начальной надежности этих элементов по первому предельному состоянию.

Под требованием равной начальной надежности сварных соединений и основного металла труб по критерию прочности будем подразумевать требование выполнения двух условий:

равенства средних значений временного сопротивления основного металла и металла сварного соединения, т.е.

$$\bar{\sigma}_в^{о.м} = \bar{\sigma}_в^{с.с}; \qquad (I67)$$

равенства вероятностной обеспеченности нормативного значения временного сопротивления $[\sigma_в]$ основного металла обеспеченности того же значения на кривой распределения $\tilde{\sigma}_в$ металла сварного соединения, т.е. выполнения условия

$$P[\sigma_в]_{о.м} = P[\sigma_в]_{с.с}, \qquad (I67а)$$

где $P[\sigma_в]_{о.м} = P\{(\tilde{\sigma}_в^{о.м}) > [\sigma_в]\}; \quad P[\sigma_в]_{с.с} = P\{(\tilde{\sigma}_в^{с.с}) > [\sigma_в]\}$ - соответственно, вероятностная обеспеченность нормативного значения для $\tilde{\sigma}_в^{о.м}$ и $\tilde{\sigma}_в^{с.с}$.

Сформулированные условия приведены на рис.II.

4.4.2. Чтобы проверить выполнение сформулированных в п.4.4.I условий, отражающих требование СНиП П-45-75, необходимо знать статистические распределения случайных величин $\tilde{\sigma}_в^{о.м}$ и $\tilde{\sigma}_в^{с.с}$. Принципы определения характеристик $\tilde{\sigma}_в^{о.м}$ описаны в разд.5. Чтобы получить характеристики распределения случайной величины $\sigma_в^{с.с}$, рассмотрим стохастическую модель прочности монтажного сварного соединения трубопровода.

4.4.3. Известно, что в большинстве сварных соединений, сваренных из нескольких слоев (за несколько проходов), имеются участки различной прочности. В работах [2I-22] показано, что наличие в сварных соединениях менее прочных (в сравнении с основным металлом труб) участков в бо[illegible]стве случаев не

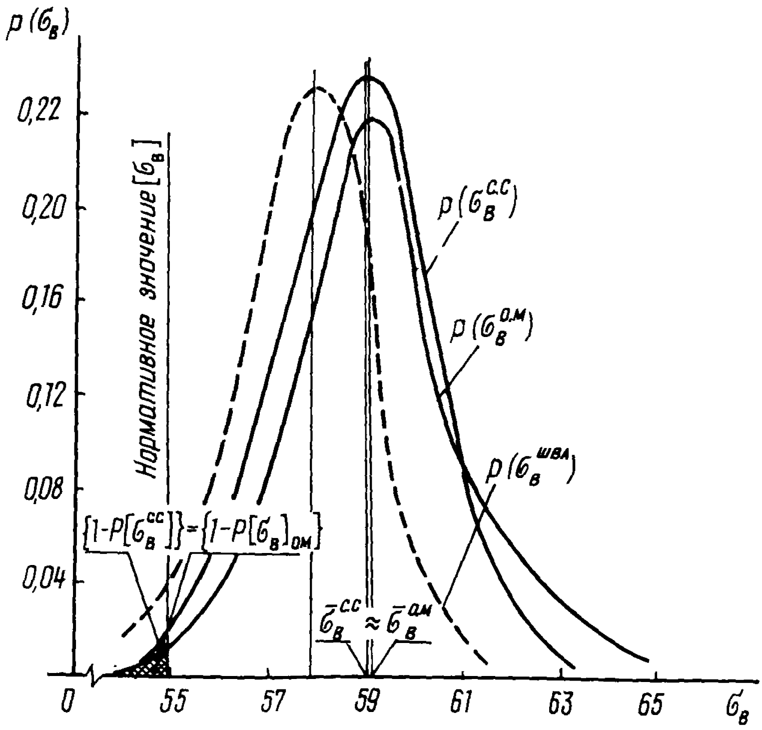

Рис.II. Условия начальной равнонадежности сварного соединения и основного металла по критерию прочности; заштрихованные площади под кривыми распределения соответствуют величинам $\{1-P[\sigma_в^{сс}]\}$ и $\{1-P[\sigma_в]_{ом}\}$

определяет агрегатной прочности сварного соединения в целом: агрегатная прочность соединения оказывается выше прочности так называемых "слабых" участков. Прочность соединений как случайная величина (с учетом эффекта контактного упрочнения и статистической изменчивости прочности металла шва) должна вычисляться по формуле

$$\tilde{\sigma}_в^{с.с} = \frac{2}{\sqrt{3}}\, \tilde{\sigma}_в^{шва} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\varkappa_э}\right), \qquad (168)$$

где $\tilde{\sigma}_{в}^{с.с}$ – случайная величина прочности сварного соединения;

$\tilde{\sigma}_{в}^{шва}$ – случайная величина прочности металла сварного шва;

$\varkappa_э = \frac{F}{d^2}$ – относительная ширина композитного сварного шва;

F – площадь сечения шва;

d – толщина свариваемых элементов (толщина стенки свариваемых труб).

4.4.4. Для наиболее распространенных технологий сварки магистральных трубопроводов статистическая прочность металла композитного сварного шва должна вычисляться согласно [20] по правилу "смеси", приводящему к зависимости [23]

$$\tilde{\sigma}_{в}^{шва} = A\left(\tilde{\sigma}_{в}^{I-II}\right)_{н.м} + B\tilde{\sigma}_{в}^{ом} + C\left(\tilde{\sigma}_{в}^{III-IV}\right)_{н.м}, \quad (169)$$

где A, B, C – экспериментально определенные неслучайные коэффициенты, определяемые по табл.4;

Таблица 4

Значения коэффициентов A,B,C в формуле определения статистической прочности металла композитного сварного шва

№ пп	Вид сварки, тип разделки	Коэффициенты, учитывающие долю участия основного и наплавленного металла		
		A	B	C
1.	Ручная дуговая (V -образная разделка) "стандарт"	0,135	0,288	0,610
2.	Ручная дуговая сварка "узкая разделка"	0,060	0,840	0,070
3.	Односторонняя автоматическая сварка под флюсом	0,08	0,200	0,620
4.	Двусторонняя автоматическая сварка под флюсом	0,120	0,630	0,260

$\left(\tilde{\sigma}_{в}^{I-II}\right)_{н.м}, \left(\tilde{\sigma}_{в}^{III-IV}\right)_{н.м}$ – случайные величины временного сопротивления наплавленного металла соответственно для I-II и III-IV слоев сварного шва;

$\tilde{\sigma}_в^{ам}$ – случайная величина временного сопротивления основного металла труб.

4.4.5. В соответствии с правилами определения числовых характеристик линейных функций случайных величин математическое ожидание и дисперсия случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{шва}$ будут составлять соответственно:

$$\bar{\sigma}_в^{шва} = A(\bar{\sigma}_в^{I-II})_{нм} + B\bar{\sigma}_в^{ам} + C(\bar{\sigma}_в^{III-IV})_{нм}, \qquad (170)$$

где $(\bar{\sigma}_в^{I-II})_{нм}, \bar{\sigma}_в^{ам}, (\bar{\sigma}_в^{III-IV})_{нм}$ – математические ожидания (средние значения) соответствующих случайных величин;

$$D_{\sigma_в^{шва}} = A^2 D_{(\sigma_в^{I-II})_{нм}} + B^2 D_{\sigma_в^{ам}} + C^2 D_{(\sigma_в^{III-IV})_{нм}}, \qquad (171)$$

где $D_{(\sigma_в^{I-II})_{нм}}, D_{\sigma_в^{ам}}, D_{(\sigma_в^{III-IV})_{нм}}$ – дисперсии соответствующих случайных величин.

4.4.6. Описание случайных величин $\tilde{\sigma}_в^{I-II}, \tilde{\sigma}_в^{ам}, \tilde{\sigma}_в^{III-IV}$ в настоящих Рекомендациях предполагается кривыми Грама-Шарлье. В связи с этим функцию и плотность распределения случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{шва}$ в соотношении (169) удобно в общем случае получать путем моделирования условия (169) методом статистических испытаний по заранее установленным законам распределения случайных аргументов $(\tilde{\sigma}_в^{I-II})_{нм}, \tilde{\sigma}_в^{ам}$ и $(\tilde{\sigma}_в^{III-IV})_{нм}$. Если распределения этих случайных аргументов окажутся нормальными, что легко проверить по формулам (118), (118а), распределение случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{шва}$ также окажется нормальным. Это позволит определить функцию и плотность распределения случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{шва}$ непосредственно с использованием таблиц, приведенных в работе [19], зная среднее значение $\bar{\sigma}_в^{шва}$ и стандарт $S_{\sigma_в^{шва}} = \sqrt{D_{\sigma_в^{шва}}}$ случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{шва}$.

4.4.7. Неоднократные проверки показали [23], что даже в случае, если распределения случайных аргументов $(\tilde{\sigma}_в^{I-II})_{нм}, \tilde{\sigma}_в^{ам}$, $(\tilde{\sigma}_в^{III-IV})_{нм}$ в соотношении (169) оказываются отличными от нормальных, закон распределения функции $\tilde{\sigma}_в^{шва}$ этих аргументов все равно является нормальным. Это объясняется следующим обстоятельством. Известно, что распределение линейной функции нескольких (в нашем случае трех) произвольных независимых законов распределения, имеющих один и тот же порядок рассеяния, близко к нормальному. В данном случае линейная функция (I69) составлена из случайных аргументов одного порядка рассеяния, в чем можно убедиться, анализируя обработки случайных величин временного сопротивления металла сварочных материалов, применяемых для I–II и III–IУ слоев, и временного сопротивления основного металла труб. Поэтому распределения $\tilde{\sigma}_в$ и $\tilde{\sigma}_т$ материала сварного шва практически всегда оказываются нормальными с параметрами, вычисляемыми по формулам (I70) и (I7I).

4.4.8. Ввиду нормальности распределения случайной величины $\tilde{\sigma}_в^{С.С.}$ (п.4.4.7) и линейности условия (I68) распределение также будет нормальным. Поэтому между параметрами случайных величин $\tilde{\sigma}_в^{СС}$ и $\tilde{\sigma}_в^{ШВА}$ будут справедливы простые соотношения

$$\bar{\sigma}_в^{СС} = K\bar{\sigma}_в^{ШВА}; \tag{I72}$$

$$\mathcal{D}_{\sigma_в^{СС}} = K^2\mathcal{D}_{\sigma_в^{ШВА}}; \tag{I73}$$

или

$$S_{\sigma_в^{СС}} = K S_{\sigma_в^{ШВА}}, \tag{I73а}$$

где $S_{\sigma_в^{СС}}$, $S_{\sigma_в^{ШВА}}$ – стандарты соответствующих случайных величин;

$K = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\mathcal{X}_э}\right)$ – коэффициент контактного упрочнения.

4.4.9. Таким образом, для достижения равной начальной надежности по условию прочности между сварными соединениями и основным металлом труб следует так выбрать сварочные материалы (определяющие $\bar{\sigma}_в^{I-II}$, $\sigma_в^{III-IV}$), режимы сварки и разделку кромок (влияющие на коэффициенты А, Б, С в табл.4), зазор (влияющий на относительную ширину сварного шва, т.е. параметр $\mathcal{X}_э$), чтобы удовлетворялись условия

$$K\bar{\sigma}_в^{ШВА} = \bar{\sigma}_в^{ОМ}; \tag{I74}$$

$$\Phi^*\left(\frac{[\sigma_в] - K\bar{\sigma}_в^{ШВА}}{K S_{\sigma_в^{ШВА}}}\right) = P[\sigma_в]_{ОМ}. \tag{I74а}$$

где $\bar{\sigma}_в^{шва}$ – по формуле (170);

$S_{\sigma_в^{шва}} = \sqrt{D_{\sigma_в^{шва}}}$ – по формуле (171);

$\Phi^*\left(\frac{[\sigma_в] - K\bar{\sigma}_в^{шва}}{K S_{\sigma_в^{шва}}}\right)$ – вероятностная обеспеченность нормативного значения $[\sigma_в]$ по кривой нормального распределения $\tilde{\sigma}_в^{с.с}$, вычисляемая по таблице в работе [19] при значении нормированной переменной $\left(\frac{[\sigma_в] - K\bar{\sigma}_в^{шва}}{K S_{\sigma^в_{шва}}}\right)$.

4.4.10. Достижение указанным технологическим путем начальной равнонадежности основного металла и сварного соединения по первому предельному состоянию исключает необходимость специального расчета начальной надежности сварных соединений по критерию прочности. Расчет начальной надежности условного линейного элемента при этом осуществляется по методике разд.4.2 без учета надежности сварных соединений.

4.4.11. Если статистической равнопрочности основного металла и сварного соединения достичь не удается и сварное соединение оказывается более "слабым" элементом системы, требуется определение начальной надежности P_0 (0) в сечении трубопровода по сварному соединению при его работе в продольном направлении с дальнейшим использованием формулы (76) для оценки начальной надежности узла.

4.4.12. Достижение статистической равнопрочности сварных соединений и основного металла труб не исключает необходимости расчета начальной надежности сварных соединений по другим предельным состояниям (деформативности, трещиностойкости). При отсутствии расчета начальной надежности по этим условиям полученные оценки надежности будут завышенными ("оптимистическими").

5. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИ ИЗМЕНЧИВЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ НАЧАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

5.I. Прочность труб с учетом процедуры их заводского контроля (механических испытаний)

5.I.I. Перед отправкой на строительство магистральных трубопроводов трубы подвергаются контролю прочностных свойств (механическим испытаниям) с соответствующей разбраковкой или сортировкой. Трубы, удовлетворяющие контрольным нормативам (как продукция высшего сорта), направляются на сооружение магистральных трубопроводов, а не удовлетворяющие контрольным нормативам,–переводятся в низший сорт и используются при строительстве водоводов и других менее ответственных сооружений.

5.I.2. Прочностные свойства "улучшенной" разбраковкой или сортировкой совокупности нефтегазопроводных труб хорошо отражают отправочные документы на трубы–сертификаты, поступающие вместе с трубами на сооружение трубопроводов и содержащие сведения о характеристиках прочности только той части труб, которая прошла через контроль и признана годной для сооружения трубопроводов.

5.I.3. Восстановленные по номерам плавок (чтобы избежать возможности повторного учета сведений по трубам одних и тех же плавок, попавших в разные отправочные партии) совокупности сертификатных данных о прочности труб могут быть непосредственно использованы для статистического представления фактора прочности в виде случайной функции по длине трубопровода при расчетах надежности. При этом числовые характеристики случайной функции прочности (предела текучести σ_T или временного сопротивления σ_B) вычисляются по программе "ONT_P ", выполненной в процессе разработки настоящих Рекомендаций и хранящейся в фонде ЛММ ВНИИСТ.

5.I.4. Если в расчетах надежности фактор прочности учитывается как случайная величина, следует на основе сертификатных данных построить межплавочные статистические распределения σ_T и σ_B и вычислять их числовые характеристики. При этом следует иметь в виду, что такие распределения по многим причинам неудовлетворительно описываются нормальным распределением или его модификациями. Поэтому для статистического описания сертификатных данных целесообразно применять кривые Грама-Шарлье, дающие в большинстве случаев удовлетворительное согласие по критерию χ^2 Пирсона и хорошо отражающие особенности статистического распределения. Такое описание целесообразно выполнять на ЭВМ по программе "BOOKNG", хранящейся в ЛНК ВНИИСТа. На рис.12 в качестве примера приведено описание этими кривыми данных по временному сопротивлению $\sigma_в$ труб диаметром 720x12 мм для одной из марок сталей.

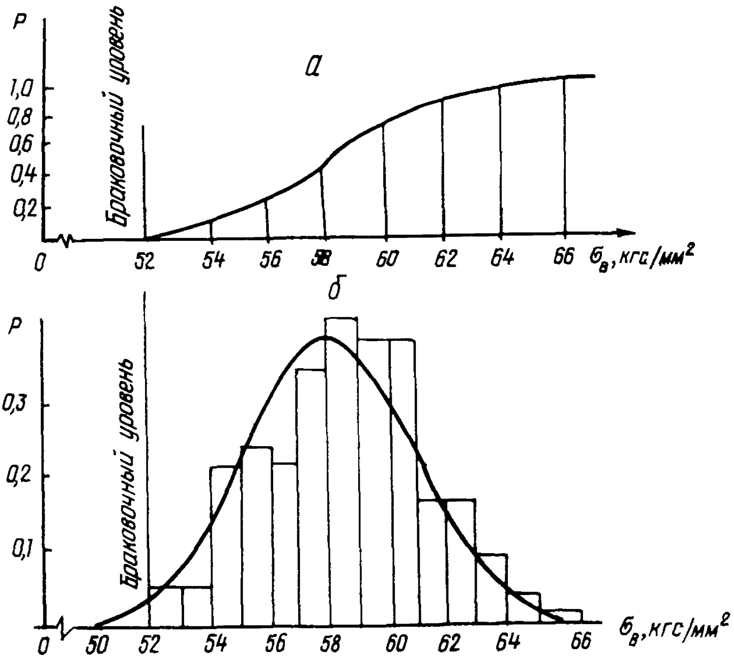

Рис.12. Пример описания кривыми Грама-Шарлье данных по временному сопротивлению $\sigma_в$ труб диаметром 720x12 мм (для одной из марок сталей):

а-функция распределения; б-плотность распределения

5.1.5. Использование сертификатных данных для статистического описания фактора прочности труб возможно далеко не всегда, так как не всегда сертификаты на трубы поступают на строительство в нужном для такого описания количестве и в срок, и не всегда является высоким качество заполнения этой отправочной документации. Кроме того, если расчет надежности осуществляется на стадии проектирования, такой документации не существует вообще. Поэтому более универсальным методом статистического описания фактора прочности труб является использование (после некоторого преобразования, описанного ниже) лабораторных данных механических испытаний, осуществляемых на заводах-поставщиках труб.

5.1.6. Результаты лабораторных механических испытаний подвергаются статистической обработке (представляются в виде статистических (ступенчатых) функции распределения). Полученные значения статистической функции распределения R_i подвергаются корректировке - байесовскому преобразованию [25], учитывающему процедуру контроля и отбраковки (сортировки) по табл.5, т.е. на основе лабораторных данных строится опытное апостериорное статистическое распределение прочности.

Таблица 5

Переход от исходных значений вероятностной обеспеченности Q к апостериорным $Q_{апостер}$ значениям

Значения вероятностной обеспеченности Q по данным лабораторных механических испытаний	Традиционный двухступенчатый контроль $Q_{апостер}$	Значения вероятностной обеспеченности Q по данным лабораторных механических испытаний	Традиционный двухступенчатый контроль $Q_{апостер}$
0,05	-	0,55	0,6244
0,10	-	0,60	0,6815
0,15	-	0,65	0,7408
0,20	-	0,70	0,7899
0,25	-	0,75	0,8347
0,30	-	0,80	0,8734
0,35	-	0,85	0,9077
0,40	-	0,90	0,9398
0,45	-	0,95	0,9707
0,50	0,5734	0,99	0,9944

5.1.7. Если фактор прочности при оценке надежности представляется в виде случайной функции по длине трубопровода, для каждого дискретного значения прочности должно производиться (исходя из полученного апостериорного статистического распределения прочности) разыгрывание этого случайного значения прочности по методу статистических испытаний (Монте-Карло) с применением способа Неймана. Сущность способа Неймана заключается в следующем [15]:

5.1.8. Пусть (рис.13) апостериорная опытная функция распределения прочности определена на интервале $|B, C|$ и ограничена сверху значением М = 1. По таблицам случайных чисел [26] генерируется пара значений равномерно распределенной величины (γ_1, γ_2) и строится точка Т с координатами

$$\eta_1 = B + \gamma_1 (C - B); \tag{175}$$

$$\eta'' = \gamma_2 M = \gamma_2 . \tag{176}$$

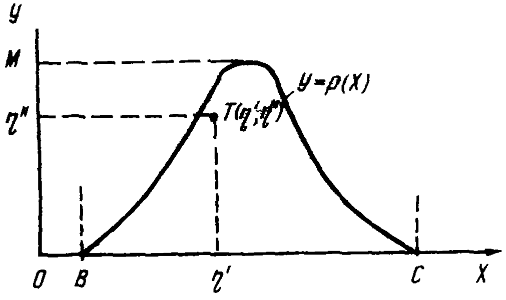

Рис.13. Разыгрывание непрерывных случайных величин методом Неймана

Если точка Т лежит под ступенчатой накопительной ломаной линией опытной апостериорной функции распределения прочности, то разыгрываемое значение случайной величины в масштабе прочности (т.е. абсцисса η') принимается, т.е. случайное значение прочности равно η'.

5.I.9. Если точка Т лежит над ступенчатой гистограммой, разыгрываемое значение отбрасывается и выбирается следующее.

5.I.IO. Случайная функция прочности трубопровода по длине условного элемента имеет количество "разыгранных" значений, соответствующее числу труб, содержащихся в этом протяженном условном элементе.

5.I.II. Если фактор прочности при расчете надежности представляется в виде случайной величины, лабораторные статистические сведения о прочности труб после байесовского преобразования по табл.5 пересчитываются (приводятся в виду гистограммы опытной плотности распределения), а затем по програме "BOOKNG" описываются кривой Грама-Шарлье с вычислением всех числовых характеристик полученного теоретического распределения.

5.2. Толщина стенки трубопровода

5.2.I. Статистические наблюдения случайного фактора толщины стенки трубопровода могут быть получены как путем непосредственных замеров этого параметра для труб сооружаемого участка трубопровода, так и на основании использования заводского контроля толщины стенки труб или толщины применяемого для их изготовления листа.

5.2.2. В зависимости от постановки задачи оценки надежности статистические наблюдения параметра толщины стенки труб, полученные непосредственно в процессе сооружения трубопровода, обрабатываются для получения характеристик толщины стенки как случайной функции по длине трубопровода или по програме "BOOKNG" для получения характеристик этого фактора как случайной величины.

5.2.3. При использовании результатов заводского контроля данного параметра для получения значений случайной функции толщины стенки по длине трубопровода следует построить статистические распределения этой случайной величины и прибегнуть к разыгрыванию случайных значений в соответствии с п.5.I.

5.2.4. Учитывая, что практически всегда случайная величина толщины стенки труб имеет нормальное распределение, разыгрывание ее значений можно производить не по методу Неймана, а простым способом [I5] , приведенным ниже.

5.2.5. Разыгрывание нормально распределенных величин осуществляется по известным детерминистическим зависимостям. Вначале определяют нормированное значение случайной величины

$$\xi' = \sqrt{-2\ln \gamma_1}\, \cos 2\pi \gamma_2 \tag{177}$$

где ξ' – нормированное значение случайной величины;

γ_1, γ_2 – равномерно распределенные в интервале |0, I| случайные числа, вырабатываемые на ЭВМ алгоритмическим путем или выбираемые по таблицам случайных чисел [26].

5.2.6. Затем определяется истинное значение случайной величины

$$\xi = a + \delta \xi', \tag{178}$$

где a, δ – соответственно среднее значение и стандарт случайной величины.

5.2.7. Для разыгрывания случайных значений изменчивых факторов как по методу Неймана, так и с использованием формулы (177), в процессе разработки настоящих Рекомендаций создана специальная программа "Монте-Карло".

5.3. <u>Радиус упругого изгиба (или кривизна оси) трубопровода</u>

5.3.1. Методика сбора и обработки натурных статистических данных о случайном радиусе упругого изгиба, представляемого в виде случайной функции по длине трубопровода, изложена в работе [11], причем для получения числовых характеристик случайной функции используется программа "*ONTp*".

5.3.2. Если расчет надежности производится на стадии проектирования, первичные данные о кривизне упругой оси трубопровода снимаются с продольного профиля проектируемого трубопровода, разрабатываемого на стадии проектирования. Для вычисления кривизны оси трубопровода по замерам красных отметок, снимаемых с продольного профиля, разработана дополнительная программа для настольной ЭВМ "ИСКРА-125", хранящаяся в ЛММИ ВНИИСТа.

5.3.3. На статистические сведения о кривизне оси трубопровода, снимаемые с продольного профиля трассы на стадии проектирования, накладывается дополнительное требование на предельно возможную кривизну оси трубопровода из условия прилегания трубопровода ко дну траншеи для случаев выпуклости и вогнутости рельефа местности. Поэтому, решив задачу о прилегании трубопровода для обоих случаев, используя, например, решения, имеющиеся в [27],[28], следует проанализировать все снятые с продольного профиля значения кривизны, ограничив их предельными значениями, полученными из указанных выше соображений.

5.4. Глубина заложения трубопровода

5.4.1. Глубина заложения трубопровода является случайной функцией по длине трубопровода, но в случае оценки надежности исходя из условия устойчивости упрощенно рассматривается как случайная величина, в основе которой лежат статистические наблюдения этого случайного параметра. Статистические наблюдения глубины заложения трубопровода целесообразно производить двукратным нивелированием: дна траншеи, соответствующих точек поверхности после засыпки трубопровода.

5.4.2. Если на практике отсутствует исполнительная геодезическая документация, статистическую информацию о глубине заложения трубопровода можно получить комбинированным методом: определить (через каждые 10 м) плановое положение трубопровода под землей с помощью специальных приборов-"трассоискателей" и замерять глубину заложения трубопровода путем прокола грунта в месте залегания трубопровода.

5.5. Удерживающая способность груза или анкерных устройств

5.5.1. Удерживающая способность анкерных устройств как статистически изменчивая величина или масса балластирующего груза $q_{бал}$ определяется расчетным путем с учетом представления входящих в расчет факторов как случайных величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13377-75 "Надежность в технике. Термины и определения", 1975.

2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические модели в теории надежности. М., "Наука", 1965.

3. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. М., "Советское радио", 1978.

4. Дзиркал Э.В. Выбор и оценка показателей надежности сложных изделий. М., "Знание", 1974.

5. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., "Советское радио", 1975.

6. Рождественский В.В., Шапиро В.Д., Шатин В.Е., Шацкая Г.А. Надежность сооружения магистральных трубопроводов. Научно-технический обзор. Серия "Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений". М., Информнефтегазстрой, 1978.

7. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. М., "Недра", 1975.

8. Методика расчета надежности магистральных газопроводов. М., ВНИИгаз, 1980.

9. Вольский Э.Л., Гарляускас А.И, Герчиков С.В. Надежность и оптимальное резервирование газовых промыслов и магистральных газопроводов. М., "Недра", 1980.

10. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М., Стройиздат, 1965.

11. Руководство по инженерной оценке и прогнозированию фактической конструктивной надежности магистральных трубопроводов (Р 301-77). М., ВНИИСТ, 1978.

12. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., "Наука", 1979.

13. Указания по проектированию и методике расчета магистральных газопроводов из труб диаметром 1420 мм (ВСН 1-46-73). М., Миннефтегазстрой, 1974.

14. Чирков В.П. Вопросы надежности механических систем. М., "Знание", 1981.

15. Васильев В.И. К вопросу о расчете конструктивной надежности трубопроводов методом Монте-Карло. Сб. научных трудов "Расчет, сооружение и эксплуатация магистральных газопроводов". М., ВНИИСТ, 1980.

16. Шапиро В.Д., Васильев В.И., Шацкая Г.А., Баталина С.Ю. Оценка уровня конструктивной надежности линейной части мощных газо-проводов. Сб. научных трудов. "Надежность и качество сооружения магистральных трубопроводов". М., ВНИИСТ, 1981.

17. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М., "Наука", 1975.

18. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М., "Наука", 1978.

19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., "Наука", 1969.

20. Гурьев А.В., Гохбах Я.А., Федоров В.И. Определение характеристик прочности и пластичности многослойных композиционных материалов. "Заводская лаборатория", 1975, № 5.

21. Бакши О.А., Шрон Р.З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой. "Сварочное производство", 1962, № 5.

22. Бакши О.А. Механическая неоднородность сварных соединений. Авт.реф.док.дисс. М., 1967.

23. Дубов И.А., Шапиро В.Д., Сбарская Н.П. Вероятностная оценка прочностных свойств сварных соединений. Сб. научных трудов. "Конструкции, методы расчета газонефтепроводов и способы их строительства". М., ВНИИСТ, 1980.

24. Надежность систем энергетики. Терминология. Сб. рекомендуемых терминов. Вып.95, АН СССР. М., "Наука", 1980.

25. Рождественский В.В., Шапиро В.Д., Дубов И.А., Васильев В.И. Оценка вероятностной обеспеченности нормативных значений прочности трубных сталей. "Строительство трубопроводов", [illegible], № 6.

26. ГОСТ 11003-73. Равномерно распределенные случайные числа. Прикладная статистика.

27. Бородавкин П.П., Таран В.Д. Трубопроводы в сложных условиях. М., "Недра", 1968.

28. Скоморовский Я.З. Свободный изгиб труб большого диаметра на строительстве магистральных трубо - проводов (научное сообщение). М., ВНИИСТ, 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕКОМЕНДАЦИИ
по расчету конструктивной надежности
линейной части магистральных трубопроводов
при их сооружении

Р 426-81

Издание ВНИИСТа

Редактор [illegible].С.Панкратьева
Корректор [illegible]
Технический редактор Т.В.[illegible]ерешева

Л- 3[illegible] Подписано в печать [illegible] Формат 60х84/16
Печ [illegible] Уч.-изд.л. 6,[illegible] Бум.л. 3,75
[illegible] экз. Цена 6[illegible] коп. Заказ 29

Ротапринт ВНИИСТа