Энгельсский технологический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
"Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А."

НАДЕЖНОСТЬ НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания и задания для практических занятий
для студентов направления
21.03.01«Нефтегазовое дело»

Энгельс 2024

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ

Дисциплина "Надежность нефтегазового оборудования" относится к числу спе-циальных дисциплин.

Цель преподавания дисциплины состоит в более глубокой подготовке специалистов для производственной, проектно-конструкторской и исследовательской деятельности в области создания и эксплуатации технологического оборудования нефте- и газодобывающих производств.

Дисциплина направлена на создание предпосылок для подготовки высококвалифицированных специалистов, способных учитывать требования высокой надежности при проектировании и эксплуатации технологического оборудования и технических систем.

Основными задачами курса являются:

- представление в формализованном виде проблемы обеспечения высокого уровня качества изделий нефте- газодобывающего машиностроения;
- определение показателей надежности (на уровне схем, конструкций, расчетов, проектирования, правильной эксплуатации и обслуживания, диагностики и ремонта), а также количественное оценивание показателей качества и технического уровня оборудования;
- определение конкретных путей повышения надежности;
- формирование представлений об организации и проведении испытаний на надежность, об обработке результатов испытаний, об организации и проведении диагностики, ремонта и обслуживания.

ПРОГРАММА КУРСА

1. Основные положения и зависимости надежности

Задачи курса. Понятия теории надежности – техническая система, элемент, надежность; показатели надежности, сохраняемость, отказ, средняя наработка на отказ.

Виды и причины повреждений и отказов оборудования. Показатели безотказности и связь между ними.

Показатели долговечности и ремонтопригодности.

Выбор критериев отказов и предельных состояний

2. Математические методы расчета надежности

Математический аппарат теории надежности. Математическая статистика и теория вероятностей как составляющие теории надежности. Расчет характеристик случайных величин. Функция распределения случайной величины. Понятия статистики и теории вероятностей – квантиль, медиана, мода, дисперсия, среднее квадратическое отклонение.

Надежность оборудования в период нормальной эксплуатации. Экспоненциальный закон распределения. Расчет показателей безотказности для периода нормальной эксплуатации.

Надежность оборудования в период постепенных отказов. Закон нормального распределения случайной величины. Квантиль нормированного нормального распределения. Совместное действие внезапных и постепенных отказов. Расчет показателей безотказности для периода постепенных отказов. Надежность восстанавливаемых изделий.

3. Надежность систем

Надежность последовательной системы при нормальном законе распределения несущей способности. Расчет несущей способности последовательной системы.

Цели и задачи резервирования. Классификация способов резервирования узлов, аппаратов и технологических линий.

Расчет показателей надежности систем с резервированием. Расчет безопасности систем при последовательно-параллельном соединении элементов и систем со сложной структурой.

Технико-экономическое сравнение целесообразности резервирования на примере параллельного включения и резервирования замещением. Требования к показателям безотказности систем.

4. Надежность по основным критериям

Расчет по критерию прочности. Оценка надежности по критерию теплостойкости. Оценка надежности при механическом изнашивании. Расчет надежности изнашиваемых устройств. Выбор расчетных параметров.

5. Расчеты надежности деталей машин отдельных групп

Надежность соединений с натягом, сварных соединений. Расчет надежности соединений с натягом по предельному моменту. Расчет сопротивления усталости сварного соединения. Коэффициент вариации предела выносливости для различных типов сварных соединений. Расчет вероятности безотказной работы резьбовых соединений по критериям нераскрытия стыка, несдвигаемости, статической прочности, сопротивления усталости.

Надежность зубчатых передач: на сопротивление контактной усталости, на сопротивление усталости при изгибе. Расчет надежности многопоточных передач. Расчет надежности валов, основные нагрузки валов. Надежность подшипников качения, скольжения.

Надежность муфт. Предохранительные муфты с разрушающимися элементами, предохранительные фрикционные муфты, роликовые обгонные муфты.

6. Диагностика оборудования и испытания на надежность

Назначение испытаний на надежность. Пути сокращения объема испытаний. Определительные испытания, понятие доверительной вероятности. Контрольные испытания. Форсирование режима испытания, коэффициент ускорения. Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний на надежность.

Основные способы повышения надежности устройств. Расчет комплексных показателей надежности.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

В практической работе необходимо ответить на два теоретических во-проса и решить две задачи. Номер варианта задания определяется в зависимо-сти от последних двух цифр номера зачетной книжки студента. Номера вопро-сов и условий к задачам для соответствующих вариантов приведены в табли-цах.

При выполнении и оформлении практических работ рекомендуется руководствоваться следующими правилами.

1. Формулировки вопросов и условие заданной задачи должны быть переписаны в контрольной работе полностью.
2. Решения задачи рекомендуется сопровождать краткими объяснениями (какая величина вычисляется) и подробными вычислениями.
3. В процессе решения задачи необходимо сначала привести формулы, на основании которых выполняются вычисления, проделать с ними все выкладки и лишь затем подставлять соответствующие числовые значения и произво-дить вычисления.
4. Во время вычислений обязательно указываются размерности заданных и определенных величин.
5. Ответы на контрольные вопросы должны быть исчерпывающие и не очень пространные. Не допускаются ответы, списанные с учебника, и лаконичные ответы.
6. Решение задач и ответы на вопросы рекомендуется иллюстрировать схемами и графиками, поясняющими текст. При использовании литературных и справочных данных обязательно приводить ссылку на источник.
7. Практическая работа выполняется в тетради. Для заметок рецензента необходимо оставить широкие поля и в конце работы несколько чистых страниц.

Таблица для определения номеров теоретических вопросов в практической работе.

Последние две цифры номера зачетной книжки студента	Номера вопросов		Последние две цифры номера зачетной книжки студента	Номера вопросов	
00, 10, 20, 30, 40	1	21	**50, 60, 70, 80, 90**	11	31
01, 11, 21, 31, 41	2	22	**51, 61, 71, 81, 91**	12	32
02, 12, 22, 32, 42	3	23	**52, 62, 72, 82, 92**	13	33
03, 13, 23, 33, 43	4	24	**53, 63, 73, 83, 93**	14	34
04, 14, 24, 34, 44	5	25	**54, 64, 74, 84, 94**	15	35
05, 15, 25, 35, 45	6	26	**55, 65, 75, 85, 95**	16	36
06, 16, 26, 36, 46	7	27	**56, 66, 76, 86, 96**	17	37
07, 17, 27, 37, 47	8	28	**57, 67, 77, 87, 97**	18	38
08, 18, 28, 38, 48	9	29	**58, 68, 78, 88, 98**	19	39
09, 19, 29, 39, 49	10	30	**59, 69, 79, 89, 99**	20	40

Контрольные вопросы

1. Показатели ремонтопригодности. Чем оцениваются показатели ремонтопригодности?
2. Основные составляющие теории надежности, используемые в расчетах, стадии их применения. К чему сводится в итоге анализ надежности объекта?
3. Основные показатели теории вероятностей и математической статистики, используемые в теории надежности.
4. Схема расчета надежности по критерию теплостойкости.
5. Дайте определение понятию «надежность». Необходимость обеспечения надежности технических объектов.
6. Дайте определение функции случайной величины. Чем характеризуется распределение случайной величины?
7. Дайте определение понятия «техническая система». Классификация систем с позиции надежности. Как определяется вероятность безотказной работы системы?
8. На примере сравнения двух видов дублирования дайте технико-экономическое обоснование целесообразности резервирования.
9. Дайте определение и объясните смысл понятий квантиль, мода, медиана, дисперсия, среднее квадратическое отклонение.
10. Какие характеристики могут служить критериями отказов и предельных состояний объекта? Чем необходимо руководствоваться при выборе тех или иных критериев?
11. Расчет надежности валов. Основные положения расчета валов.
12. Основные способы повышения надежности устройств.
13. Основные показатели надежности. В каком одном из четырех состояний может находиться технический объект?
14. Показатели безотказности. Дайте определение основным показателям.
15. Основные показатели долговечности и сохраняемости.
16. Какие комплексные показатели оценивают надежность объекта на различных интервалах его использования?
17. Вероятность безотказной работы в период действия внезапных и постепенных отказов.
18. Основные показатели, характеризующие надежность восстанавливаемых изделий.
19. Расчет надежности зубчатых передач.
20. Основные положения метода расчета надежности последовательной системы.

21. Расчет показателей надежности систем при различных способах резервирования.
22. Надежность оборудования в период постепенных отказов. Основные зависимости, используемые при расчете надежности.
23. Критерии, характеризующие работоспособность деталей машин. Основные принципы расчета надежности по основным критериям.
24. Схема расчета надежности по критерию прочности.
25. Пути повышения надежности оборудования в химической промышленности. Цели и задачи резервирования. Классификация основных способов резервирования технических объектов.
26. Схема расчета надежности изнашиваемых устройств.
27. Схема расчета надежности соединений с натягом.
28. Основные положения метода расчета надежности сварных соединений.
29. Основные критерии расчета резьбового соединения. Методика расчета.
30. Принцип расчета надежности предохранительной муфты с разрушающимися элементами.
31. Необходимость проведения испытаний на надежность. Пути сокращения объема испытаний.
32. Расчет вероятности безотказной работы подшипников качения.
33. Основные положения расчета надежности подшипников скольжения.
34. Принцип расчета надежности роликовых обгонных муфт.
35. Надежность оборудования в период нормальной эксплуатации. Какой закон используется при расчете надежности? Его достоинства.
36. Расчет надежности предохранительной фрикционной муфты. Как определяется вероятность срабатывания муфты при действии пикового момента?
37. Основные зависимости расчета показателей безотказности в период нормальной эксплуатации.
38. Дайте определение понятиям «определительные испытания», «доверительная вероятность». Достоинства и недостатки форсирования режима испытаний.
39. Необходимость проведения контрольных испытаний. Какие показатели определяются для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий?
40. Дайте определение понятию «отказ». Виды и причины отказов и повреждений оборудования.

Решите задачу №1

Оценить вероятность безотказной работы двухступенчатого редуктора по следующим данным. Условные запасы прочности по средним значениям несущей способности и нагрузке составляют:

- подшипники входного вала $n_1=n_2$;
- зубчатая передача n_3;
- подшипники промежуточного вала $n_4=n_5$;
- червячная передача n_6;
- подшипники выходного вала $n_7=n_8$;
- все валы $n_9=n_{10}=n_{11}$.

Задано, что несущие способности передач, подшипников и валов нормально распределены с одинаковым коэффициентом вариации $V_{R1}=\ldots V_{R11}=0,1$.

Нагрузка по редуктору распределена также нормально с коэффициентом вариации $V_F=0,1$. Математические ожидания несущей способности элементов $m_{Ri}=n_i \cdot m_F$.

Таблица для определения исходных данных в задаче №1

Исходные данные	Номер первого контрольного вопроса									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$n_1=n_2$	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
n_3	1,4	1,4	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,6
$n_4=n_5$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
n_6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$n_7=n_8$	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,5	1,6	1,8	1,8
$n_9=n_{10}=$ $=n_{11}$	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Исходные данные	**Номер первого контрольного вопроса**									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
$n_1=n_2$	1,4	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7	1,4	1,4	1,4	1,6
n_3	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8	1,6
$n_4=n_5$	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
n_6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,8	1,5	1,5
$n_7=n_8$	1,8	1,8	1,8	1,8	1,4	1,4	1,8	1,7	1,5	1,8
$n_9=n_{10}=$ $=n_{11}$	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,8	1,5

Методические указания к решению задачи № 1

Для решения задачи надежности последовательной системы применяется простой, достаточно точный метод, основанный на описании закона распределения несущей способности системы нормальным распределением.

1. Задаются двумя значениями F_A и F_B фиксированных нагрузок. Ориентировочно:

$$F_A=(1+3V_F)\cdot m_F, \quad (1)$$

$$F_B=(1+V_F)\cdot m_F, \quad (2)$$

где m_F – математическое ожидание нагрузки.

2. Вычисляются квантили нормального распределения всех элементов, соответствующие их вероятностям безотказной работы при нагрузках F_A и F_B:

$$u_{PAi} = \frac{F_A - m_{Ri}}{V_{Ri} \cdot m_{Ri}}, \quad (3)$$

$$u_{PBi} = \frac{F_B - m_{Ri}}{V_{Ri} \cdot m_{Ri}}, \quad (4)$$

где $m_{Ri}=n_i\cdot m_F$ – математические ожидания несущей способности элементов (для условий задачи $i=1\div11$).

3. По квантилям из табл. 1.1 [2] или из графика в приложении находятся вероятности безотказной работы всех элементов при нагрузках F_A и F_B. Для задачи -

$$P_{A1}, P_{A2}, \ldots. P_{A11},$$
$$P_{B1}, P_{B2}, \ldots. P_{B11}.$$

4. Определяются общие вероятности безотказной работы для соответствующих нагрузок:

$$P_A = \prod_{i=1}^{11} P_{Ai}, \quad (5)$$

$$P_B = \prod_{i=1}^{11} P_{Bi}. \quad (6)$$

5. Вычисляется математическое ожидание m_R и коэффициент вариации V_R несущей способности редуктора

$$m_R = F_A - \frac{F_B - F_A}{u_{PB} - u_{PA}} \cdot u_{PA}, \quad (7)$$

$$V_R = \frac{F_B - F_A}{F_A \cdot u_{PB} - F_B \cdot u_{PA}}, \quad (8)$$

где u_{PA}, u_{PB} – квантили нормального распределения, соответствующие вероятностям безотказной работы P_A и P_B.

6. Вероятность безотказной работы системы определяется по квантилю, вычисляемому по формуле

$$u_P = -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{(\bar{n} \cdot V_R)^2 + V_F^2}}, \quad (9)$$

где $\bar{n} = \frac{m_R}{m_F}$ - условный запас прочности по средним значениям несущей способности и нагрузки.

Решите задачу №2

Соединение зубчатого колеса со сплошным валом диаметром d, мм соответствует посадке X. Соединение нагружено вращающим моментом, заданным случайной нормально распределенной величиной со средним значением T_{CP}, Н·м и коэффициентом вариации V_T=0,12. Определить общую вероятность безотказной работы соединения (по критерию прочности сцепления и по критерию прочности охватывающей детали), если известно, что диаметр ступицы зубчатого колеса D, мм; длина посадочной поверхности L, мм; высота микронеровностей посадочных поверхностей R_{Z1}=4 мкм, R_{Z2}=6 мкм. Модуль упругости материала деталей (сталь) $E=2{,}1\cdot10^5$ МПа. Среднее значение предела текучести материала охватывающей детали σ_t=580 МПа, коэффициент вариации V_t=0,06. Среднее значение и коэффициент вариации коэффициента трения соответственно равны f=0,12, V_f=0,1. Коэффициент, учитывающий уменьшение со временем давления, равен K=1,5.

Таблица для определения исходных данных в задаче №2

Исходные данные	Номер первого контрольного вопроса									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Диаметр d, мм	42	42	42	45	36	36	36	36	29	29
Диаметр D, мм	88	88	88	88	66	66	66	66	58	58
Длина L, мм	76	76	44	52	52	52	62	62	62	62
Посадка X	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{s7}$	$\frac{H7}{r6}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H8}{x8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H7}{r6}$	$\frac{H8}{s7}$	$\frac{H7}{r6}$
Момент T_{CP}	1350	215	215	90	1000	500	100	145	125	115
Исходные данные	**Номер первого контрольного вопроса**									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Диаметр d, мм	29	29	22	22	22	22	26	26	26	26
Диаметр D, мм	58	58	48	48	48	48	52	74	80	80
Длина L, мм	64	64	64	64	52	52	52	52	52	56
Посадка X	$\frac{H8}{x8}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H8}{u8}$	$\frac{H8}{s7}$	$\frac{H8}{x8}$	$\frac{H7}{r6}$	$\frac{H8}{x8}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H8}{s7}$
Момент T_{CP}	560	325	20	120	110	175	105	375	20	75

Методические указания к решению задачи № 2

Надежность соединений с натягом оценивается в основном по двум показателям: критерию прочности сцепления и критерию прочности охватывающей детали.

1. Вероятность безотказной работы по критерию прочности сцепления P_C определяется из таблицы 1.1. [2] (или из графика в приложении) нормального распределения в зависимости от квантили

$$u_{PC} = -\frac{\bar{n}_C - 1}{\sqrt{(\bar{n}_C \cdot V_{lim})^2 + V_T^2}}, \qquad (1)$$

где $\bar{n}_C = \frac{\bar{T}_{lim}}{\bar{T}}$ - коэффициент запаса прочности сцепления по средним значениям моментов.

Среднее значение предельного по прочности сцепления момента $\bar{T}_{lim}$ [Н·м] (т.е. момент, который может передать соединение диаметром d [мм], длиной L [мм], с натягом N [мкм] при среднем давлении на посадочных поверхностях $\bar{P}$ [МПа] и коэффициенте трения f) равен

$$\bar{T}_{lim} = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3} \pi d^2 L \bar{P} \cdot f}{K}, \qquad (2)$$

где К – коэффициент, учитывающий возможность уменьшения сил сцепления со временем.

Для соединения сплошного вала со ступицей с наружным диаметром D [мм] из материалов с одинаковым модулем упругости E [МПа] и одинаковым коэффициентом поперечного сжатия

$$\bar{P} = \frac{(N - u)E \cdot 10^{-3}}{d(1 + \psi)}, \qquad (3)$$

где $\psi = \frac{1 + \left(d/D\right)^2}{1 - \left(d/D\right)^2}$; u – поправка на обмятие посадочных поверхностей, зависящая от высоты их микронеровностей, $u=1{,}2(R_{Z1}+R_{Z2})$.

Коэффициент вариации предельного момента

$$V_{lim} = \sqrt{V_P^2 + V_f^2}, \qquad (4)$$

где V_f – коэффициент вариации трения, V_P – коэффициент вариации давления;

$$V_P = \frac{S_N}{\bar{N} - u}, \qquad (5)$$

здесь $\bar{N}$ - среднее значение натяга – равно разности средних значений отклонений вала $\bar{e}$ и отверстия $\bar{E}$, которые в системе отверстия можно выразить через табличные значения допусков диаметров вала t_e и отверстия t_E и нижнее отклонение диаметра вала e_i

$$\bar{N} = \bar{e} - \bar{E} = e_i + 0{,}5(t_e - t_E). \qquad (6)$$

Среднее квадратическое отклонение натяга

$$S_N = \frac{1}{6}\sqrt{t_e^2 + t_E^2}\,. \qquad (7)$$

2. Вероятность безотказной работы по критерию прочности охватывающей детали $P_П$ определяется из таблицы 1.1 [2] (или из графика в приложении) нормального распределения в зависимости от квантиля

$$u_{РП} = -\frac{\bar{n}_П - 1}{\sqrt{(\bar{n}_П \cdot V_t)^2 + V_{ЭКВ}^2}}\,, \qquad (8)$$

где $\bar{n}_П = \frac{\bar{\sigma}_t}{\bar{\sigma}_{ЭКВ}}$ - коэффициент запаса прочности по средним значениям предела текучести $\bar{\sigma}_t$ и напряжения $\bar{\sigma}_{ЭКВ}$, причем по условию прочности должно быть $\bar{\sigma}_{ЭКВ} < \bar{\sigma}_t$.

Наибольшее эквивалентное напряжение

$$\bar{\sigma}_{ЭКВ} = \frac{2 \cdot \bar{P}}{1 - \left(d/D\right)^2}\,. \qquad (9)$$

Коэффициент вариации $V_{ЭКВ}$ напряжения $\sigma_{ЭКВ}$ принимается равным коэффициенту вариации V_P давления на посадочной поверхности соединения.

3. Итогом решения задачи является определение общей надежности соединения с натягом как произведение двух вероятностей безотказной работы P_C и $P_П$.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. ГОСТ 27.002 – 2015 Надежность в технике. Термины и определения.
2. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: Учебное пособие для машиностроительных специальностей вуза. – М.: Высш.шк., 1998. – 238 с.
3. Зубова А.Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств. – Л.: Машиностроение, 1971. – 184 с.; 1987. – 215 с.
4. Муромцев Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. – М.: Химия, 1990. – 144 с.
5. Дорохов, А. Н. Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов. – СПб. : Лань, 2011.
6. Малафеев, С. И. Надежность технических систем: примеры и задачи / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. – СПб. : Лань, 2012.
7. Невзоров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудования. Учебное пособие для студентов технических специальностей вузов в 2-х частях. – СибГТУ. г. Красноярск, 1998.
8. Хазов Б.Ф., Дидусев В.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

Дополнительная

9. Малкин, В.С. Надежность технических систем и техногенный риск : Учеб. пособие / В.С. Малкин. – Ростов-н/Д : Фе-никс, 2010. – 432 с.
10. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 480 с.
11. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности: Справочник. – М.: Химия, 1983. – 352 с.
12. Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств: Справочник / Под ред. Г.Г. Смирнова– Л.: Машиностроение, 1988. – 207 с.
13. Справочник механика химических производств. – Донецк: Донбас, 1988. – 207 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ
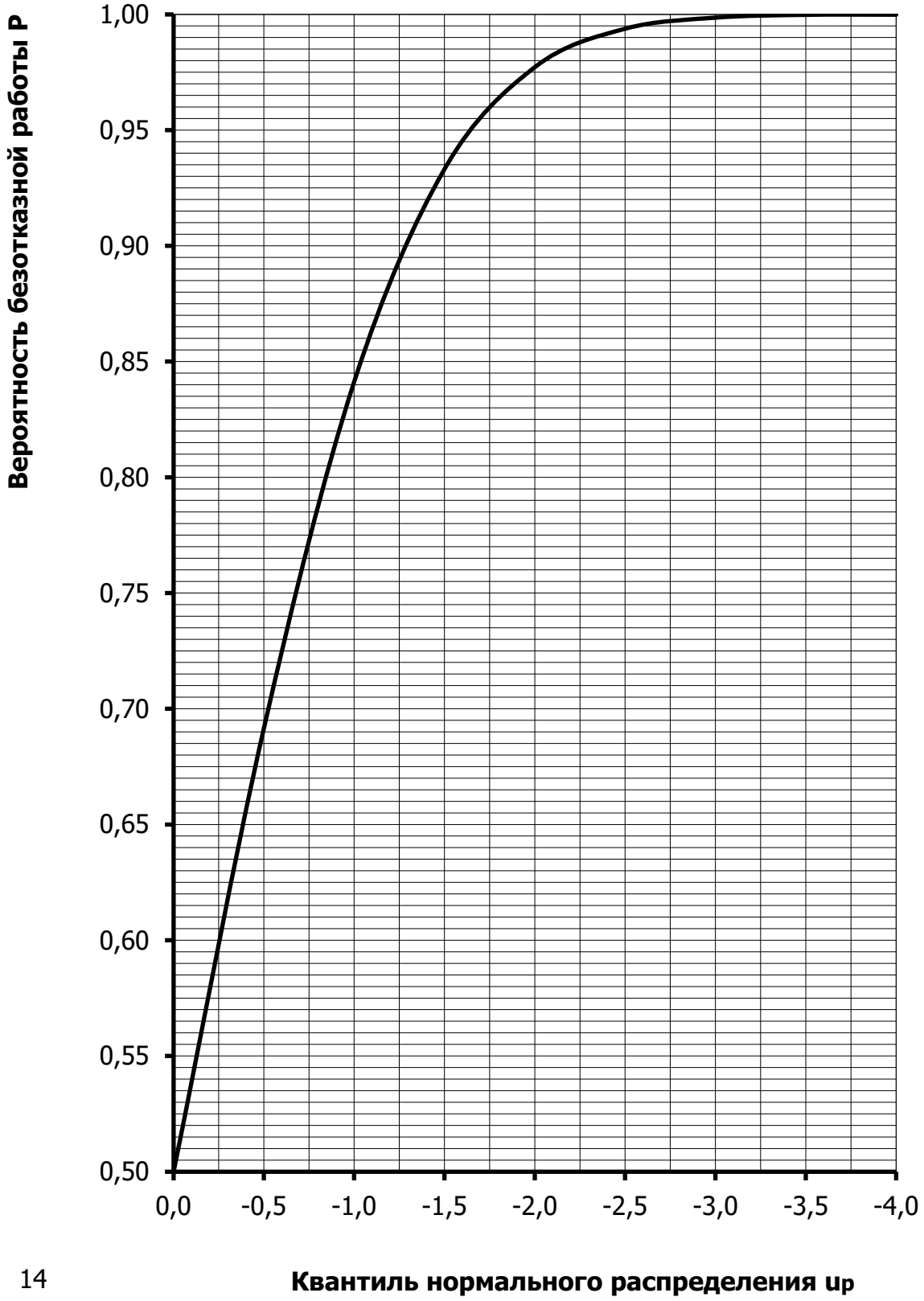
ГРАФИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ