

УДК 621.311

Р.М. Шерстобитов

Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия

ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 10 КВ

Периодически в практике эксплуатации ВЛ 6...10 кВ наблюдаются случаи разрушения железобетонных опор [1], через которые протекал ток однофазного замыкания на землю (ЗНЗ), не превышающий 10 А.

Исследования влияния однофазного ЗНЗ на железобетонные опоры в сетях напряжения 6...10 кВ проводились и раньше [2], но целью данной статьи не являлась связь термодинамических параметров в комлевой части железобетонной опоры с электрическими параметрами на питающей подстанции.

Решение задачи по определению критической продолжительности режима ЗНЗ в сетях с железобетонными опорами при различных значениях тока ЗНЗ (или полноте замыкания) может быть определена по следующему выражению [3]:

$$\tau_k = \frac{(C_b + C_g)\Delta\theta K_i}{6\pi f C_o L K_u U_{fp} \sqrt{U_f^2 + U_{fp}^2}}, \quad (1)$$

где C_b — теплоемкость подземной части железобетонной опоры. По данным [3, 4] для расчета можно принять $C_b = 0,23 \cdot 10^6$ Дж/°С; C_g — теплоемкость грунта подземной части железобетонной опоры, прилегающего к опоре и нагреваемого до такой же температуры, как и бетон (по данным [3, 5] для расчета можно принять $C_g = 0,16 \cdot 10^6$ Дж/°С); $\Delta\theta$ — разность между температурой, при которой начинается испарение влаги (100 °С) и начальной температурой подземной части опоры и грунта, °С; K_i — коэффициент, учитывающий связь между током через железобетонную опору и током ЗНЗ при разной полноте замыкания (с учетом данных [3] для опыта на подстанции Курганная $K_i = 1 \dots 4,41$); f — частота сети, для расчета можно принять $f = 50$ Гц; K_u — коэффициент, учитывающий распределение падения напряжения на заземленной фазе (для последующих расчетов по данным [3] принимаем 0,73...0,83); C_o — удельная емкость одного километра провода ВЛ (по данным [2] для расчета можно принять $C_o = 5,5 \cdot 10^{-9}$ Ф/км); L — суммарная протяженность электрической сети, км; U_f — значение фазного напряжения сети нормального режима (для расчета можно принять 6300 В); U_{fp} — напряжение заземленной фазы на шинах подстанции, В.

Выражение (1) позволяет с приемлемой для практического использования точностью дать количественную оценку допустимой длительности существования режима ЗНЗ с гарантией того, что при возникшей полноте замыкания железобетон-

ная опора не потеряет своей первоначальной прочности.

Результаты расчетов критической продолжительности режима ЗНЗ, проиллюстрированные на рис. 1, показывают, что и в относительно коротких электрических сетях 10 кВ может произойти термическое повреждение железобетонной опоры. Например, для сети протяженностью 114 км от подстанции Курганная при напряжении на заземленной фазе 570 В необратимые процессы деструктивных преобразований железобетона опоры наступят через $\tau_k = 21,3$ ч. Быстрее всего (около 1...1,5 ч) эти процессы будут протекать, когда напряжение на заземленной фазе будет в диапазоне от 5,2 до 5,7 кВ независимо от длины отходящих ВЛ 10 кВ.

Изменение фазных, линейных напряжений, силы тока нулевой последовательности на питающей линии фиксировалось прибором «Энергомонитор 3.3», установленным на питающей подстанции, в ячейке трансформатора напряжения (НАМИ-10). Для определения силы тока, проходящего через опору, был подключен трансформа-

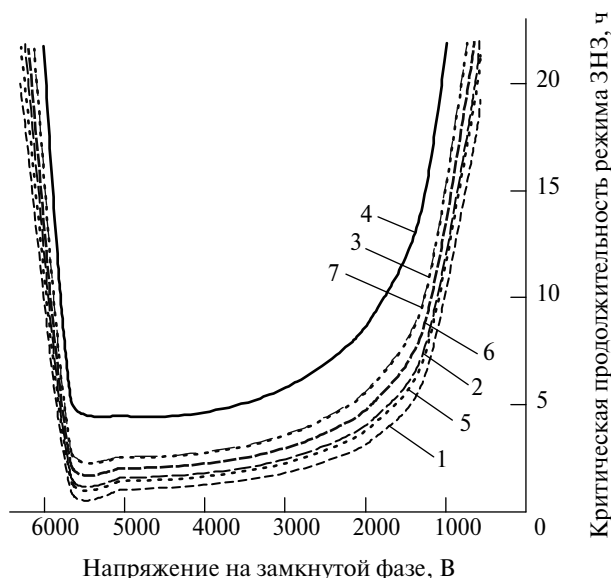


Рис. 1. График критической продолжительности ЗНЗ для подстанций:

- 1 — Куберле-2, $L = 203$ км; 2 — Камышевская, $L = 97$ км; 3 — Журавлевская, $L = 51$ км;
- 4 — Ребричанская, $L = 26$ км; 5 — Курганная, $L = 114$ км;
- 6 — Орловская, $L = 68$ км; 7 — Львовская, $L = 50$ км

тор тока ТПЛМ-10-30/5. Численные показания силы тока фиксировались амперметром, установленным непосредственно на изолированной площадке, на рабочем месте исследователя.

Для измерения температуры грунта были использованы пять термометров сопротивления платиновых ТСП/1-1288, окружающего воздуха — термометр сопротивления медный ТСМ/1-1288. Все использованные термометры сопротивления были изготовлены в НПК «Эталон» г. Волгодонска Ростовской области и испытаны на изолирующую электрическую способность напряжением равным 3-кратному линейному, но не ниже 40 кВ. Четыре термометра сопротивления ТСП/1-1288 монтировались на направляющем штыре длиной 2000 мм и распределялись по длине штыря равномерно (рис. 2).

На месте испытания размещались погружением на границе опора — грунт. Пятый термометр сопротивления ТСП/1-1288 устанавливался на по-

верхности грунта на расстоянии 350 мм от тела опоры. Температура окружающего воздуха фиксировалась термометром сопротивления медным ТСМ/1-1288, расположенном на изолирующей площадке. Все термометры сопротивления были подключены к восьмиканальному измерителю температуры ИТ 58-103, трасса подключения изолировалась от земли с помощью оперативных штанг.

Характеристика использованных приборов отражена в табл. 1.

При замыкании фазы путем включения масляного выключателя на питающей линии система автоматического повторного включения (АПВ) была выведена, регулировка емкостных токов осуществлялась изменением конфигурации сетей и их протяженности. Сопротивление заземлений изменялось проведением опытов на опорах с необходимыми характеристиками в грунте ненарушенной структуры и установкой опор в грунт с различным сопротивлением.

В табл. 2 приведены исходные данные при проведении опытов.

Опыты 1, 2, 5, 6 и 7 проводились на опорах в грунте ненарушенной структуры, 3 и 4 — на опорах в насыпном грунте с большим удельным сопротивлением.

Присоединение провода к верхней арматуре опоры для создания искусственного замыкания на землю выполнялось после очищения ме-

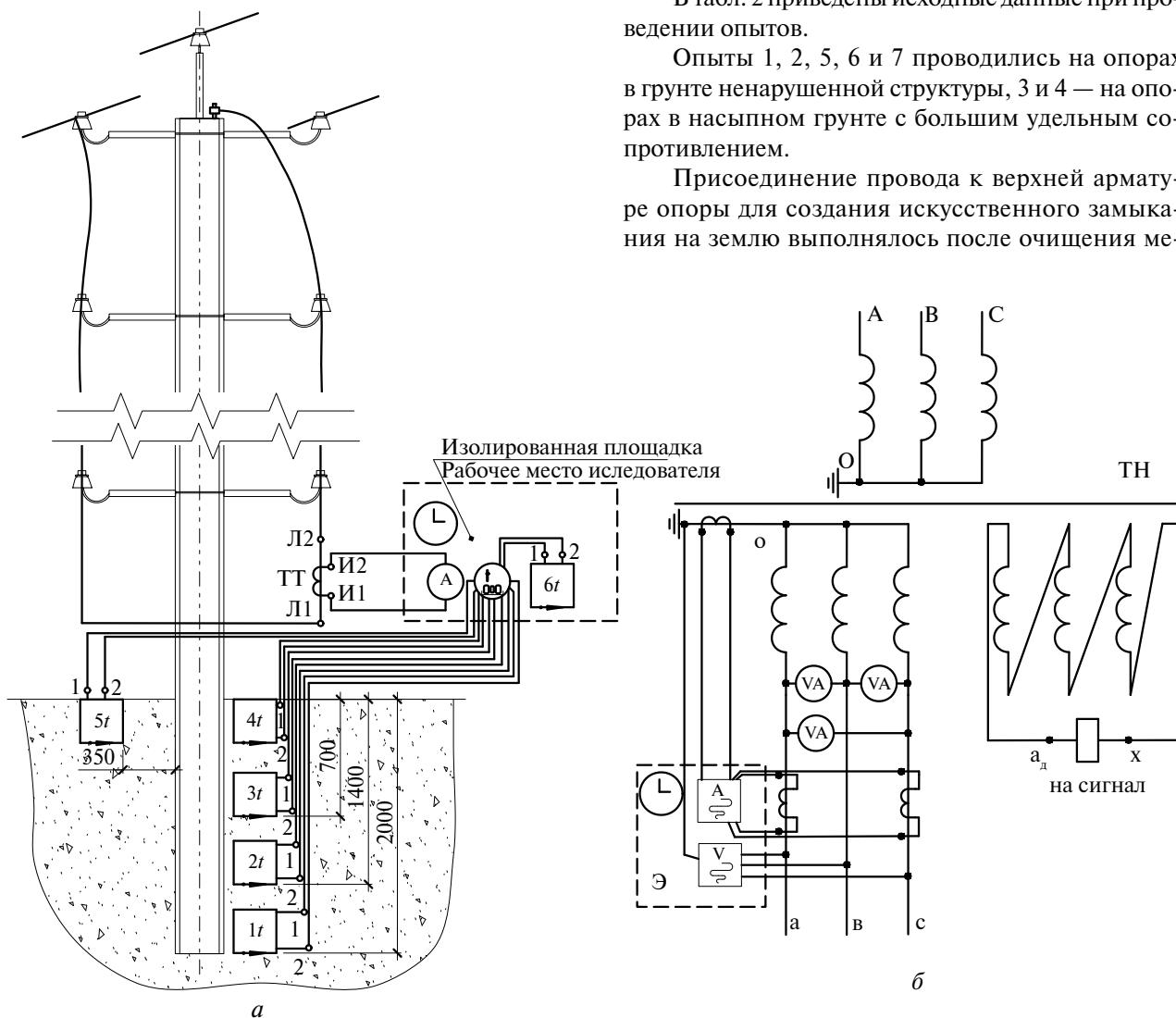


Рис. 2. Схемы измерения температуры грунта:

а — расположение и подключение приборов; б — подключение энергомонитора

Таблица 1

Характеристика приборов, использованных при опытах

Прибор	Обозначение на рис. 2	Тип	Класс точности
Трансформатор тока	ТТ	ТПЛМ-10-30/5	0,5
Трансформатор напряжения	ТН	НАМИ-10	0,5
Амперметр	А	Э525	2,0
Анализатор ПКЭ	Э	Энергомонитор 3.3	1,0
Измеритель температуры	<i>t</i>	ИТ 58-103	0,5
Термометры сопротивления платиновые	1 <i>t</i> , 2 <i>t</i> , 3 <i>t</i> , 4 <i>t</i> , 5 <i>t</i>	ТСП/1-1288	0,5
Термометр сопротивления медный	6 <i>t</i>	ТСП/1-1288	0,5

Таблица 2

Исходные данные при проведении опытов

№ опыта	Питающая подстанция	Емкостный ток сети I_c , А	Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м	Сопротивление заземления опоры R , Ом	Грунт	Климатические условия проведения испытания	
						Температура окружающего воздуха, °С	Влажность окружающего воздуха, %
1	Ребричанская	0,78	58	45	Глина влажная	+29	68
2	Львовская	1,48	63	40	Суглинок	+22	75
3	Журавлевская	1,52	155	95	Супесок	+19	70
4	Орловская	2,03	140	115	Супесок	+31	65
5	Камышевская	2,91	110	19	Глина с примесью песка	+23	72
6	Курганная	4,07	254	158	Разнородные смеси глины и песка	+28	65
7	Куберле-2	6,04	42	46	Глина	+30	64

ста соединения от ржавчины с помощью плашечного зажима типа ПС-2-1. Изоляция линии от тела опоры, включающая в себя следующие элементы (ВЛ 10 кВ — трансформатор тока, ТПЛМ-10-30/5 — арматура опоры), выполнялась с помощью траверса особой конструкции (см. рис. 2) и прикрепленного к ней провода типа А-50 с помощью изоляторов марки ШФ 20.

При исследовании соблюдались требования [6]. Место проведения опыта было огорожено, вывешены плакаты «Стоять, напряжение!», для входа и выхода с рабочего места исследователя использовались средства защиты (боты и т. п.). Все работы на ВЛ 10 кВ и подстанции 35/10 кВ выполнялись по наряду допуска согласно [6].

Опыты 1, 2, 5, 7 проведены на опорах сопротивления, заземление которых изменялось от 19 до 46 Ом·м, напряжение заземленной фазы на шинах подстанции было одинаково во всех опытах и равнялось значению стремящемуся к 0 В. Ток замыкания, проходящий по телу опоры, в разных опытах находился в диапазоне 0,6 до 5,9 А, колебание численного значения незначительное, резкие повышения или понижения не фиксировались.

В течение всего времени исследования видимых признаков, указывающих на замыкания на землю, не наблюдалось, изменение термодинамических параметров в комлевой части железобе-

тонной опоры и электрических параметров на питающей подстанции происходило незначительно, результаты представлены в табл. 3.

Для изучения изменения термодинамических параметров в подземной части железобетонной опоры в насыпном грунте проводились опыты 3, 4.

В специально подготовленный котлован диаметром не менее 1 м и глубиной 2 м устанавливалась опора типа СВ-10,5 без искусственного заземлителя и засыпалась морским песком. После измерения сопротивление заземления опор составило 95 и 115 Ом·м соответственно. Напряжение заземленной фазы на шинах подстанции не изменялось с течением времени и, как в предыдущих опытах, стремилось к нулю (табл. 3). Каких-либо значимых различий термодинамических и электрических процессов, видимых признаков в ранее проведенных опытах не фиксировалось.

В начале проведения шестого опыта напряжение заземленной фазы на шинах подстанции было равно 570 В, сопротивление заземления опоры — 152 Ом·м. Видимые признаки замыкания на землю отсутствовали. После подачи напряжения датчики начали фиксировать повышение температуры через 55 мин после начала опыта, приборы показали резкий бросок тока, проходящего через тело опоры, скачкообразное повышение температуры, причем кратковременное увеличение температуры про-

Результаты опытов

№ опыта	Время от начала опыта, ч	Температура, °С						Напряжение, кВ			Ток замыкания, проходящий по телу опоры, А
		1t	2t	3t	4t	5t	6t	Фаза А	Фаза В	На поврежденной фазе С	
1	0	28,1	27,3	27,4	27,4	28,0	28,9	10,2	10,2	0	0,60
	23	24,3	26,8	26,9	27,1	24,2	24,0	10,2	10,1	0	0,55
	33	27,5	27,2	26,8	26,9	27,6	28,5	10,3	10,2	0	0,55
2	0	21,2	20,7	20,8	20,4	21,8	22,9	10,2	10,5	0	1,05
	23	14,6	17,8	18,9	19,2	13,6	13,3	10,2	10,3	0	1,15
	33	22,3	20,1	19,5	19,9	23,1	24,0	10,3	10,2	0	1,10
3	0	18,5	17,5	17,8	17,9	19,0	19,4	10,2	10,4	0	1,25
	23	14,3	16,8	16,9	17,1	14,2	14,0	10,1	10,2	0	1,15
	33	17,4	17,1	16,8	16,9	18,0	18,5	10,4	10,2	0	1,15
4	0	29,0	29,4	28,9	29,1	29,3	31,2	10,3	10,4	0	1,90
	23	22,8	21,2	21,0	20,8	21,9	23,1	10,3	10,3	0	1,90
	33	27,8	27,0	26,0	26,4	28,5	29,3	10,3	10,3	0	1,95
5	0	22,3	21,5	21,5	21,5	21,6	23,2	10,3	10,3	0	2,40
	23	15,4	19,3	20,1	21,2	15,0	15,3	10,4	10,3	0	2,50
	33	24,0	21,1	20,5	20,9	24,6	25,2	10,3	10,3	0	2,40
6	0	27,0	28,0	28,3	27,4	30,3	27,5	9,8	10,3	0,57	2,64
	10	49,0	42,7	30,6	29,3	37,2	12,0	9,9	10,2	0,56	2,76
	23	93,9	73,8	34,4	28,3	51,9	22,0	5,5	6,2	6,0	0,34
	33	66,6	74,7	45,7	31,6	61,3	16,3	5,6	6,1	6,0	0,12
7	0	29,5	29,1	28,8	28,9	29,0	30,2	10,4	10,2	0	5,80
	23	22,6	21,8	21,9	21,1	22,2	23,4	10,3	10,2	0	5,90
	33	27,4	27,1	26,8	26,9	28,0	28,5	10,4	10,3	0	5,90

изошло по всей длине комлевой части железобетонной опоры, а на шинах подстанции анализатор ПКЭ записал броски напряжений (всех трех фаз), стремящихся к номинальным значениям. Это обусловлено иссушением пластов земли, имеющих более низкую проводимость.

После подачи напряжения повышение температуры комлевой части железобетонной опоры первые 17 ч происходило равномерно, причем наиболее быстро около 2,5 °С/ч фиксировал датчик 1t, расположенный на поверхности почвы в непосредственной близости от тела опоры, и датчик 2t — около 1,3 °С/ч.

Сила тока, проходящая через тело опоры первые 17 ч, установилась постоянной и колебалась в диапазоне 2,6...2,7 А. Наблюдались кратковременные 2...3 с, непостоянные броски тока, достигающие 3 А. Визуальных изменений на поверхности земли и на теле опоры не наблюдалось.

Через 18 ч после начала шестого опыта на подстанции Курганная анализатор ПКЭ зафиксировал изменения на шинах подстанции, все три фазных напряжения устремились в сторону номинальных значений, изменение произошло скачкообразно в течение 10 мин, в дальнейшем фазные напряже-

ния практически стали равны номинальным, причем напряжение заземленной фазы С превысило фазу А.

В этот отрезок времени амперметр на месте исследования регистрировал постепенное уменьшение силы тока, проходящего через тело опоры, которое достигло значения 0,6 А, и с течением времени сила тока продолжала уменьшаться.

С увеличением напряжения на заземленной фазе С увеличивается выделяющаяся в месте повреждения энергия, что незамедлительно фиксируют датчики температуры, установленные в комлевой части железобетонной опоры. Скорость нагрева резко возрастает, наибольшего значения достигает датчик температуры 1t около 6,0 °С/ч, расположенный на поверхности почвы в непосредственной близости от тела опоры. Через 22 ч он достигает своего максимума — 95,1 °С. В дальнейшем после иссушения верхнего слоя грунта идет постепенное смещение центра нагрева подземной части железобетонной опоры вглубь, на 0,7...0,8 м. Через 33 ч после начала опыта температура подземной части опоры на глубину 0,8 м выравнивается и становится равной 81 °С.

Сила тока, проходящего через тело опоры, опускается до своего минимального значения

0,2 А. На шинах подстанции фазные напряжения достигли номинальных значений, приборы контроля изоляции нарушение нормального режима не фиксировали.

После окончания опыта измеренное сопротивление заземления опоры превысило 10 000 Ом·м.

Резюмируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. При токах ЗНЗ менее 10 А возможны протекания необратимых процессов деструктивных преобразований железобетонных опор.

2. По напряжению поврежденной фазы при ЗНЗ можно судить о целостности подземной части железобетонной опоры.

3. Математический расчет критической продолжительности ЗНЗ, при котором наступают необратимые процессы деструктивных преобразований железобетонных опор, произведен правильно. Расхождения вычисленного результата (21,3 ч) с опытным (22 ч) обусловлено следующими причинами:

- температура в опыте 6 измерялась не на теле опоры, а на расстоянии 5...7 см от тела опоры, это обусловлено техническими проблемами при погружении штыря с датчиками температуры. Поэтому существовала погрешность, связанная с отставанием нагрева измерителей температуры;

- в расчетном выражении (1) ввиду отсутствия исходных данных о температурах почвы за начальную температуру принималась температура окружающего воздуха, что не совсем точно, поскольку на глубине 50...60 см температура будет ниже.

Список литературы

1. Шерстобитов, Р.М. Показатели надежности и затраты на восстановления элементов сети ВЛ 10 кВ при однофазных замыканиях на землю / Р.М. Шерстобитов, М.А. Юндин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2011. — № 1. — С. 17–18.
2. Забелло, Е.П. Однофазные замыкания на землю в воздушных линиях 10 кВ на железобетонных опорах / Е.П. Забелло, М.П. Кондратьев // Электричество. — 1983. — № 1. — С. 51–54.
4. Бернацкий, А.Ф. Электрические свойства бетона / А.Ф. Бернацкий, Ю.В. Целебровский, В.А. Чунчин. — М.: Энергия, 1980. — С. 68–69.
3. Юндин, М.А. Определение характера и места однофазных повреждений в сельских электрических сетях 10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М.А. Юндин. — М., 1984. — С. 169.
5. Рюденберг, Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. — С. 714.
6. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок РД 153–34.0–03.150–00. — М.: НЦ ЭНАС, 2001. — С. 209.

УДК 621.314

М.В. Коломьцев

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ В СЕЛЬСКИХ СЕТЯХ 0,38 КВ

Сельские электрические сети 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками имеют значительную несимметрию токов из-за неравномерного распределения однофазных нагрузок между фазами трехфазных линий. В результате этого токи отдельных фаз отличаются по величине в три и более раз, а ток в нулевом проводе достигает 50 % и более.

В сельских электросетях широкое применение получили трансформаторы потребительских ТП со схемой соединения обмоток Y/Y_n, которые обладают большим сопротивлением нулевой последовательности, примерно в 10 раз превышающее сопротивление прямой последовательности. Поэтому при несимметричной нагрузке фаз в этих трансформаторах возникает значительное напряжение нулевой последовательности, вызывающее несимметрию фазных напряжений на выходе трансформатора.

Технологические потери электроэнергии в сельских сетях за последнее десятилетие выросли почти в 3 раза и достигают 30 %. При этом отклонение напряжения у потребителей вместо $\pm 5\%$ по ГОСТ составляет 30...+20 % [1]. Причиной этого является возрастание в сетях 0,38 кВ доли однофазной нагрузки по сравнению с трехфазной симметричной нагрузкой. Этому способствовало, в частности, применение в коттеджном строительстве мощных (до 50 кВт и выше) однофазных стабилизаторов напряжения [2].

4 июня 2008 г. Президент Российской Федерации подписал указ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики». Согласно этому указу, в целях снижения энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации, обеспечения рационального и экологически ответ-