

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

*С.М. Простов, А.В. Покатилов, М.В. Соколов, ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный
технический университет им. Т. Ф. Горбачева», Россия*

Приведены закономерности изменения физико-механических свойств глинистых пород при электрохимическом закреплении, алгоритмы расчета параметров комбинированного крепления выработок с использованием данной технологии.

Технология электрохимического закреплении (ЭХЗ) весьма перспективна при укреплении малопроницаемых горных пород. Активное применение данной технологии сдерживается недостаточной изученностью закономерностей изменения свойств пород в зоне закреплении и отсутствием методик расчета параметров упроченной оболочки при комбинированном креплении выработок.

Проведены комплексные исследования физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов при ЭХЗ по двух- и однорастворной схемам. Исследования проводились на двух опытных полигонах. Основные технологические параметры экспериментального ЭХЗ грунтов приведены в таблице.

Таблица

Параметры экспериментального ЭХЗ грунтов

Плотность компонентов			Вид закреплении (время гелеобразования T , ч)	Плотность тока j , А/м ²	Максимальная сила тока I , А	Объем инъецируемого раствора V , м ³	Время инъецирования τ , ч	Максимальное напряжение на электродах, В	Общее количество электродов	Объемное соотношение инъецируемого раствора
жидкого стекла γ_c , г/см ³	кремнефтористо-водородной кислоты γ_k , г/см ³	хлористого кальция $\gamma_{\text{кл}}$, г/см ³								
1,05 1,20	–	1,08	двухрастворное	9,74	30	0,06+ 0,033	60+ 30	150	6	–
1,06	1,037	–	однорастворное (45)	16,67	30	0,035	50	120–160	2	1:9
1,06	1,03	–	однорастворное (60)	8,33	15	0,16	50	70–110	6	1:9

Ранее проведенные исследования позволили установить, что участок активного воздействия при ЭХЗ включает следующие основные зоны, принципиально различающиеся по происходящим в их пределах физико-химическим процессам:

- электроосмоса (происходит фильтрация природной влаги в катодную область с последующим ее удалением через катод);
- электрохимической обработки (происходит насыщение анодной области раствором через основной электрод);
- средняя (переходная между двумя выше указанными зонами).

При двухрастворном ЭХЗ физико-механические свойства грунта определялись путем лабораторных испытаний образцов, отобранных из этих зон, причем пробы отбирались в следующие основные моменты времени: до начала эксперимента, через 7 и 14 сут после его

окончания. Графики изменения основных физико-механических параметров образцов (сцепления C , влажности W и коэффициента внутреннего трения f), приведены на рис. 1.

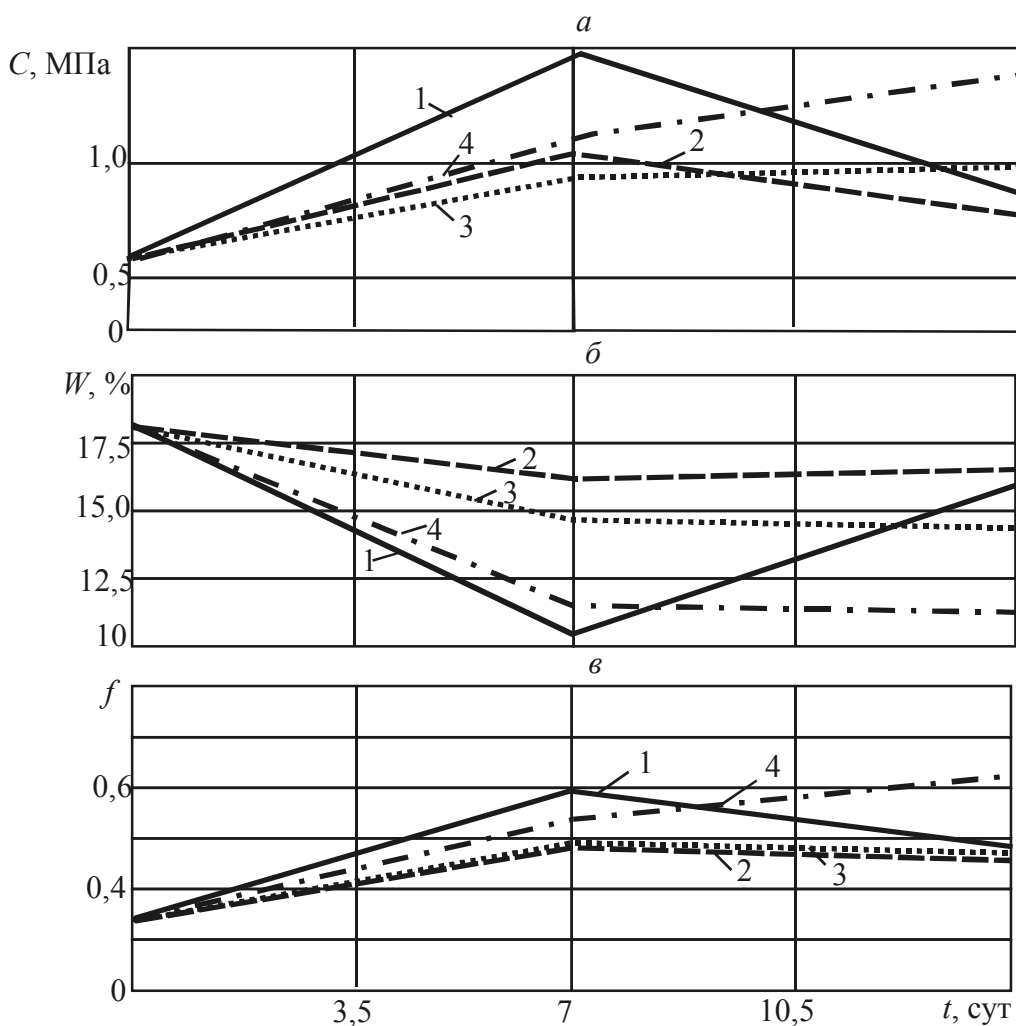


Рис. 1. Изменение сцепления грунта C (а), влажности W (б) и коэффициента внутреннего трения f (в) во времени:

1 – зона электроосмоса; 2 – средняя зона; 3 – зона электрохимической обработки при $\gamma_c = 1,05 \text{ г/см}^3$; 4 – зона электрохимической обработки при $\gamma_c = 1,2 \text{ г/см}^3$

Установлено, что в зоне электрохимической обработки сцепление C грунта увеличилось, причем при использовании жидкого стекла при $\gamma_c = 1,2 \text{ г/см}^3$ в диапазоне от 0,65 МПа до 1,4 МПа, а при $\gamma_c = 1,05 \text{ г/см}^3$ – от 0,65 до 1 МПа. В зоне электроосмотического осушения по сравнению с первоначальным значением 0,65 МПа сцепление грунта выросло до 1,5 МПа, но через 14 сут после окончания обработки оно снизилось до 0,85 МПа. В средней зоне величина C занимает промежуточное положение, а через 14 сут тоже снижается (рис. 1, а).

Естественная влажность грунта составляла $W_0 = 18,23 \%$, после проведения ЭХЗ состояние массива существенно изменилось. Во всех зонах через 7 сут после отключения установки наблюдалось снижение уровня W , причем наиболее интенсивно – в зоне электроосмотического осушения. Через 14 сут влажность у катода (в зоне электроосмоса) увеличилась за счет процессов вторичного увлажнения грунтовыми водами и атмосферной влагой (рис. 1, б). Величина коэффициента внутреннего трения f выросла по сравнению с первоначальным значением во всех закрепляемых зонах, причем в период $t = 7\text{--}14$ сут она стабилизировалась на уровне $f = 0,46\text{--}0,64$ (рис. 1, в).

При однорастворном закреплении использовались составы с различной плотностью кремнефтористоводородной кислоты (см. табл.): $\gamma_k = 1,037 \text{ г/см}^3$ (время гелеобразования $T =$

45 ч) – состав №1; $\gamma_k = 1,030 \text{ г/см}^3$ ($T = 60 \text{ ч}$) – состав №2;

Анализ результатов, полученных по данным лабораторных испытаний образцов и представленных в графическом виде на рис. 2 и 3, позволил сделать следующие основные выводы:

– в зоне одностороннего закрепления составом №2 величина сцепления C и угла внутреннего трения φ в зоне ЭХЗ меньше, чем при использовании состава №1 в 1,52 и 1,1 раза соответственно, что обусловлено в основном различием во времени гелеобразования; в промежуточной зоне и зоне электроосмотического осушения величины сдвиговых характеристик при использовании обоих составов увеличились по отношению к начальному в диапазонах: φ – в 1,6–2 раза; C – в 4,8–6,3 раза; максимальное увеличение сцепления грунта C наблюдалось в зоне ЭХЗ при составе №1 и составило 15,42 раза по отношению к начальному;

– диапазоны модуля деформации глинистого массива E , полученные по результатам лабораторных испытаний, имеют различия, характерные для трех основных зон ЭХЗ, при этом в ходе закрепления №2 в зоне ЭХЗ увеличение модуля деформации E по отношению к начальному составило 2,86 раза, а при закреплении №1 – 3,9 раза; в промежуточной зоне произошло увеличение E при закреплении №1 в 1,86 раза, а при закреплении №2 в 1,78 раза, данное незначительное увеличение связано с тем, что в эту зону проникло недостаточно укрепляющего раствора, поэтому процессы коагуляции глинистых частиц протекали менее интенсивно; в зоне электроосмоса отмечено монотонное увеличение E с течением времени, что связано с постепенным насыщением этой зоны поровой жидкостью и положительно заряженными ионами укрепляющего раствора.

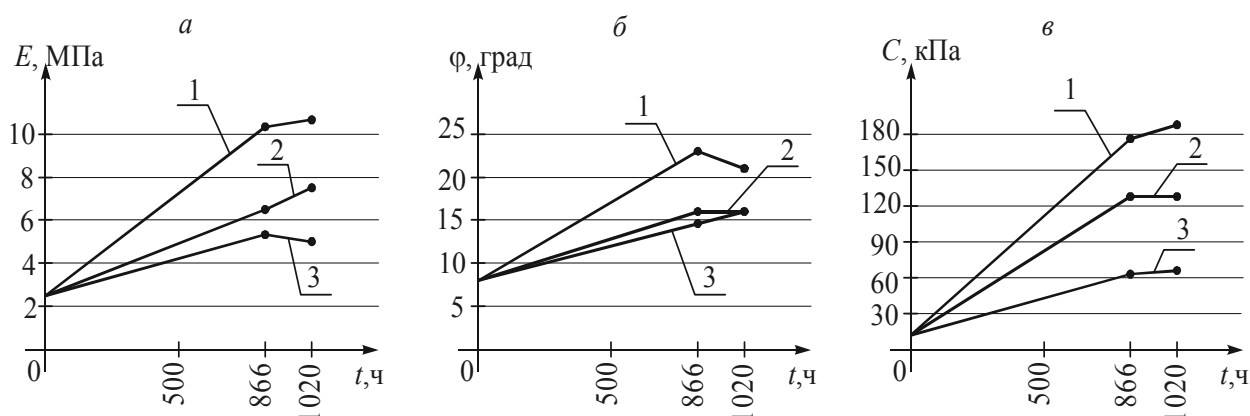


Рис. 2. Изменение модуля деформации E (а), угла внутреннего трения φ (б) и сцепления C (в) грунта в ходе закрепления №1 (время гелеобразования состава $T = 45 \text{ ч}$):

1 – зона ЭХЗ; 2 – зона электроосмоса; 3 – промежуточная зона

Важной дополнительной характеристикой физического состояния влагонасыщенных глинистых грунтов, определяющей их пластичность, является консистенция I_L . Анализ графиков изменения параметра I_L в различных зонах одностороннего ЭХЗ (рис. 4) позволил выявить следующие закономерности: начальное значение консистенции I_L соответствует полутвердым грунтам; через 1020 ч от начала обработки при закреплении №1 величина I_L уменьшилась в 4,08 раза, что соответствует переходу грунта в твердое состояние; на момент окончания эксперимента величина I_L при закреплении №1 в 1,23 раза больше, чем при закреплении №2.

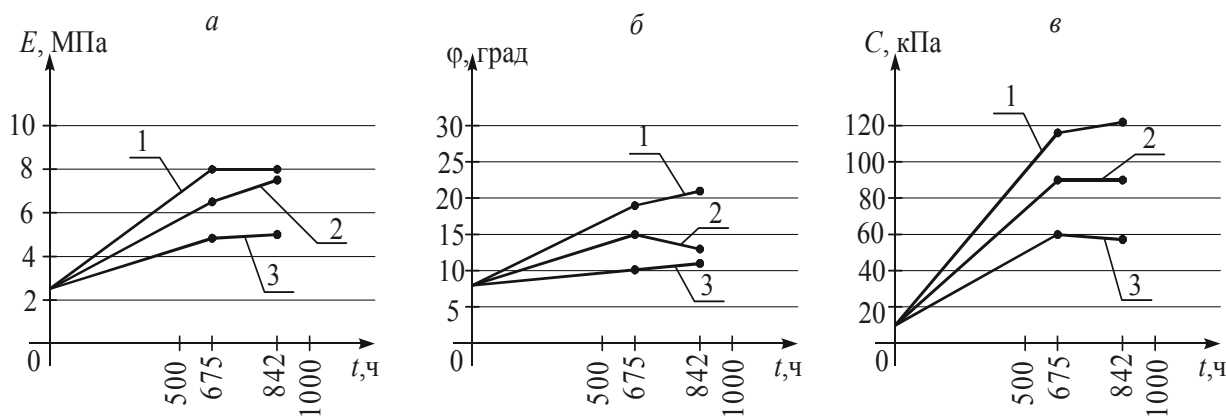


Рис. 3. Изменение модуля деформации E (а), угла внутреннего трения φ (б) и сцепления C (в) грунта в ходе закрепления №2 ($T = 60$ ч):
1 – зона ЭХЗ; 2 – зона электроосмоса; 3 – промежуточная зона

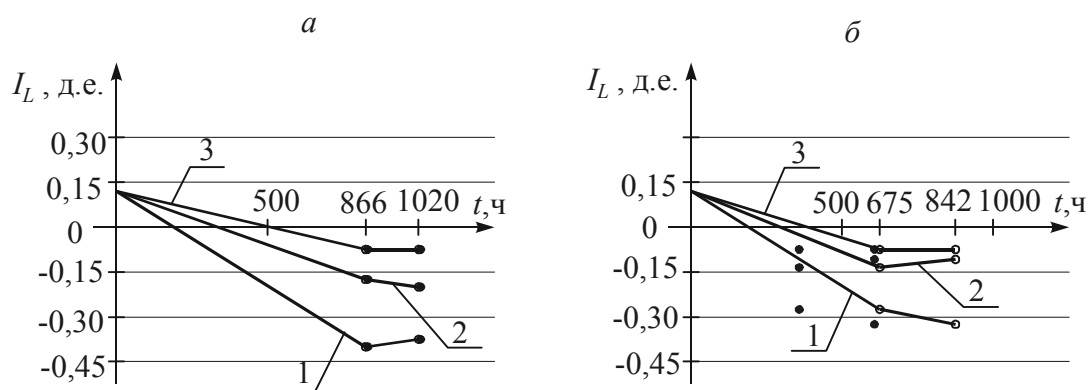


Рис. 4. Изменение показателя консистенции грунта I_L в ходе закрепления №1 (а) и №2 (б):

1 – зона ЭХЗ; 2 – зона электроосмоса; 3 – промежуточная зона

При проведении испытаний грунтов статическим зондированием с использованием аппаратуры ТЕСТ-К2 вдавливание зонда осуществлялось буровой установкой с постоянной скоростью. По измеренному сопротивлению грунта под острием и по боковой поверхности вдавливаемого в грунт зонда были получены характеристики свойств массива глинистых грунтов: модуль деформации E , угол внутреннего трения φ , сцепление C .

В целом результаты статического зондирования (рис. 5) качественно подтверждают результаты лабораторных испытаний. С учетом полученных количественных диапазонов установлены следующие особенности:

- максимальное увеличение модуля деформации E наблюдалось в зоне ЭХЗ, при этом относительное увеличение через 818 ч после начала ЭХЗ составило в 3,5 раза; конечные значения E в зонах электроосмоса при использовании обоих составов имеют незначительное увеличение в 1,1 раза; в зоне электроосмоса величина E через 818 ч уменьшилась составила 2,8 МПа, данное уменьшение произошло вследствие увлажнения прикатодной зоны;

- изменения показателей угла внутреннего трения φ и сцепления грунта C повторяют закономерности изменений значения модуля деформации E ; при закреплении №1 значение φ в зоне ЭХЗ через 148 ч после начала ЭХЗ увеличилось в 1,42 раза, а через 818 ч – в 1,65 раза по сравнению с начальным; при закреплении №1 увеличение составило 1,33 раза через 215 ч, а через 626 ч – 1,38 раза.

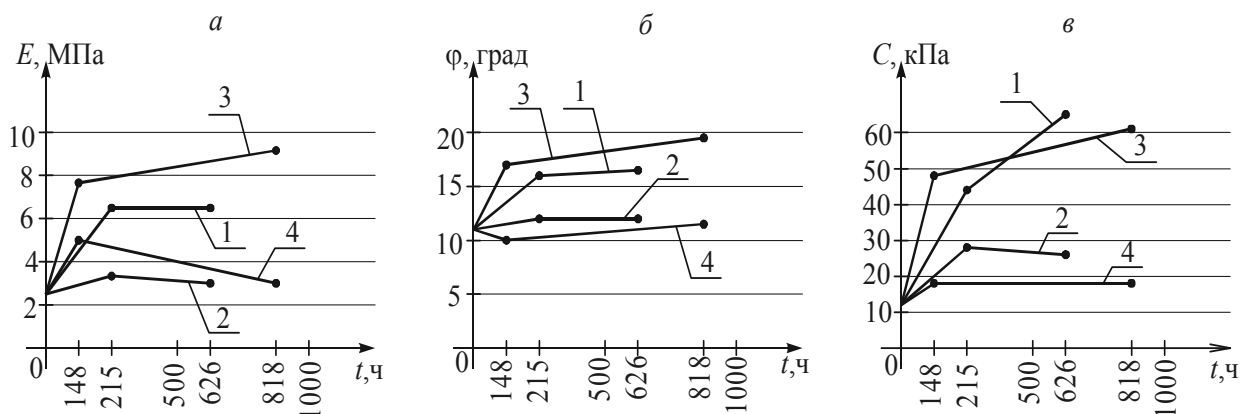


Рис. 5. Изменение модуля деформации (а), угла внутреннего трения (б) и сцепления (в) при основном и пробном закреплении, полученные по результатам статического зондирования:

1, 2 – зоны ЭХЗ и электроосмоса закрепления №2; 3, 4 – зоны ЭХЗ и электроосмоса закрепления №1

Основной практический вывод из анализа полученных результатов комплексных исследований состоит в следующем: при укреплении методом ЭХЗ прочностные и деформационные параметры могут быть улучшены в требуемых для обеспечения устойчивости сооружений пределах как при двух-, так и при однорастворной технологии, причем в последнем случае время гелеобразования закрепляющего раствора должно быть меньше времени электрообработки.

Полученные в результате лабораторных и производственных экспериментальных исследований данные о закономерностях пространственно-временных изменений и диапазонах прочностных и деформационных свойств горных пород, упрочненных методом ЭХЗ, позволяют перейти к обоснованию параметров крепления выработок с использованием данной технологии.

Физические предпосылки и теоретические основы расчета основных параметров комбинированного крепления подземных выработок, включающего традиционную (железобетонную, металлическую, анкерную) крепь и несущую оболочку из упрочненных пород, рассмотрены в ряде работ авторов. Доказано, что целесообразно рассматривать два основных случая расчета и проектирования подобной комбинированной крепи:

- при относительно малых нагрузках на крепь (строительство подземных выработок на глубинах до 50 м, при отсутствии аномальных по напряженно-деформированному состоянию зон в виде тектонических нарушений, пльвунов или карстов) следует использовать для расчета методы теории упругости и критерии прочности в локальной зоне конструкции;

- при относительно высоких нагрузках, соизмеримых с прочностными параметрами материала несущей оболочки (подземные выработки на глубине более 50 м, на сопряжениях, пересечениях с пластами, в зонах повышенных тектонических напряжений), следует использовать условия предельного равновесия и критерий в форме паспорта прочности породы.

Ниже рассмотрены алгоритмы, реализующие указанные выше методические подходы.

Циклический алгоритм расчета толщины упрочненной оболочки в упругом режиме приведен на рис. 6. Основные операции состоят в следующем:

- задают параметры нагрузки γ , H , λ ; γ , H принимают по результатам инженерно-геологических изысканий и данных о сооружениях, создающих дополнительную нагрузку; за основное расчетное значение λ принимают $\lambda = 1,0$, в отдельных неблагоприятных случаях рассматриваются величины в диапазоне $\lambda = 1,0-0,7$;

- задают прочностные свойства закрепленных пород C , φ , $\sigma_{сж}$;

- определяют безразмерную (относительную) прочность материала породной оболочки при сжатию;

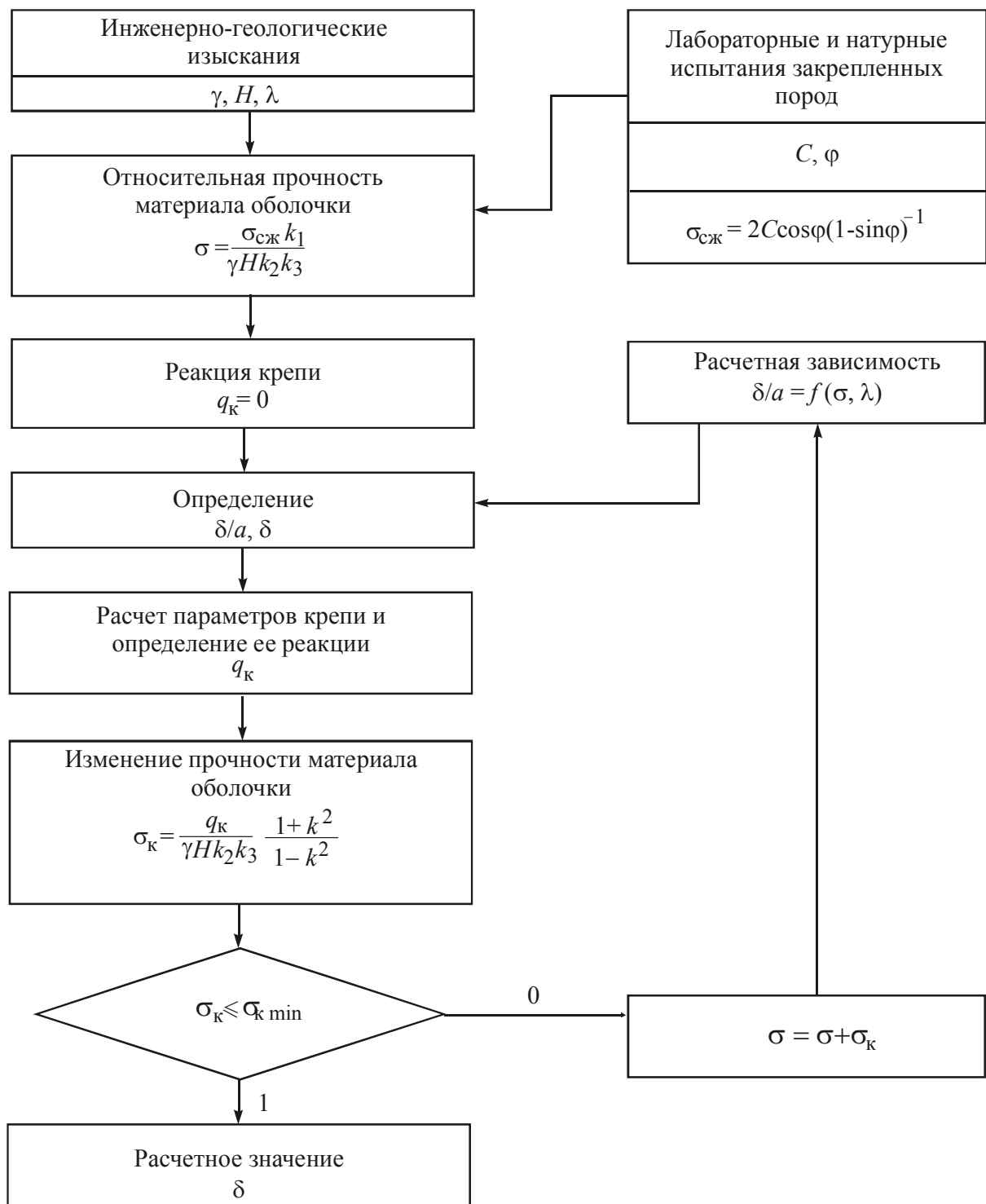


Рис. 6. Алгоритм расчета толщины δ породной оболочки в упругом режиме:

γ – усредненный удельный вес пород; H – глубина заложения выработки; λ – коэффициент бокового распора; k_1, k_2, k_3 – безразмерные нормативные коэффициенты ($k_1 \leq 1$; $k_2 = 1,1-1,5$; $k_3 = 1,2-1,3$); δ – толщина закрепленной оболочки; a – приведенный радиус выработки; k – отношение внешнего и внутреннего диаметров оболочки; $\sigma_{k \min}$ – минимальное значение σ_k (погрешность расчета)

- по специальным зависимостям или номограмме по значениям σ и λ находят безразмерную толщину породной оболочки δ/a и абсолютное значение δ ;
- определяют реакцию капитальной крепи q_k с использованием стандартной методики и изменение прочности материала породной оболочки;
- повторяют циклы вычисления; в случае малых значений q_k по сравнению с вертикальной

нагрузкой $q_0 = \gamma H$ влиянием крепи можно пренебречь, в противном случае расчет продолжается до выполнения условия $\sigma_k \rightarrow 0$ ($\sigma_k \leq \sigma_{k \min}$).

Сущность расчета комбинированной крепи по упруго-пластической схеме состоит в том, что породная оболочка, переходя в состояние предельного равновесия, воспринимает некоторую часть внешней нагрузки q , а оставшаяся часть передается на крепь в виде нагрузки q_k . Следует найти такие параметры породной оболочки, при которых нагрузка на крепь станет равной ее несущей способности.

Расчет толщины породной оболочки при заданной реакции крепи и нахождение нагрузки на крепь при заданной толщине породной оболочки реализуется с помощью общего алгоритма, включающего следующие операции (рис. 7):

- задают проектную конструкцию крепи и определяют ее несущую способность q_k ; возможно экспериментальное определение q_k по результатам стендовых испытаний крепи;
- определяют величину расчетной вертикальной нагрузки $q = \gamma H k_2 k_3$ и относительную безразмерную величину несущей способности крепи q_k/q ;
- вводят характеристики прочности породной оболочки – $C, \varphi, \sigma_{сж}$ и остаточной прочности материала породной оболочки в запредельной стадии – $C_{ост}, \sigma_{ост}$;
- по специальным расчетным зависимостям определяют толщину породной оболочки δ .

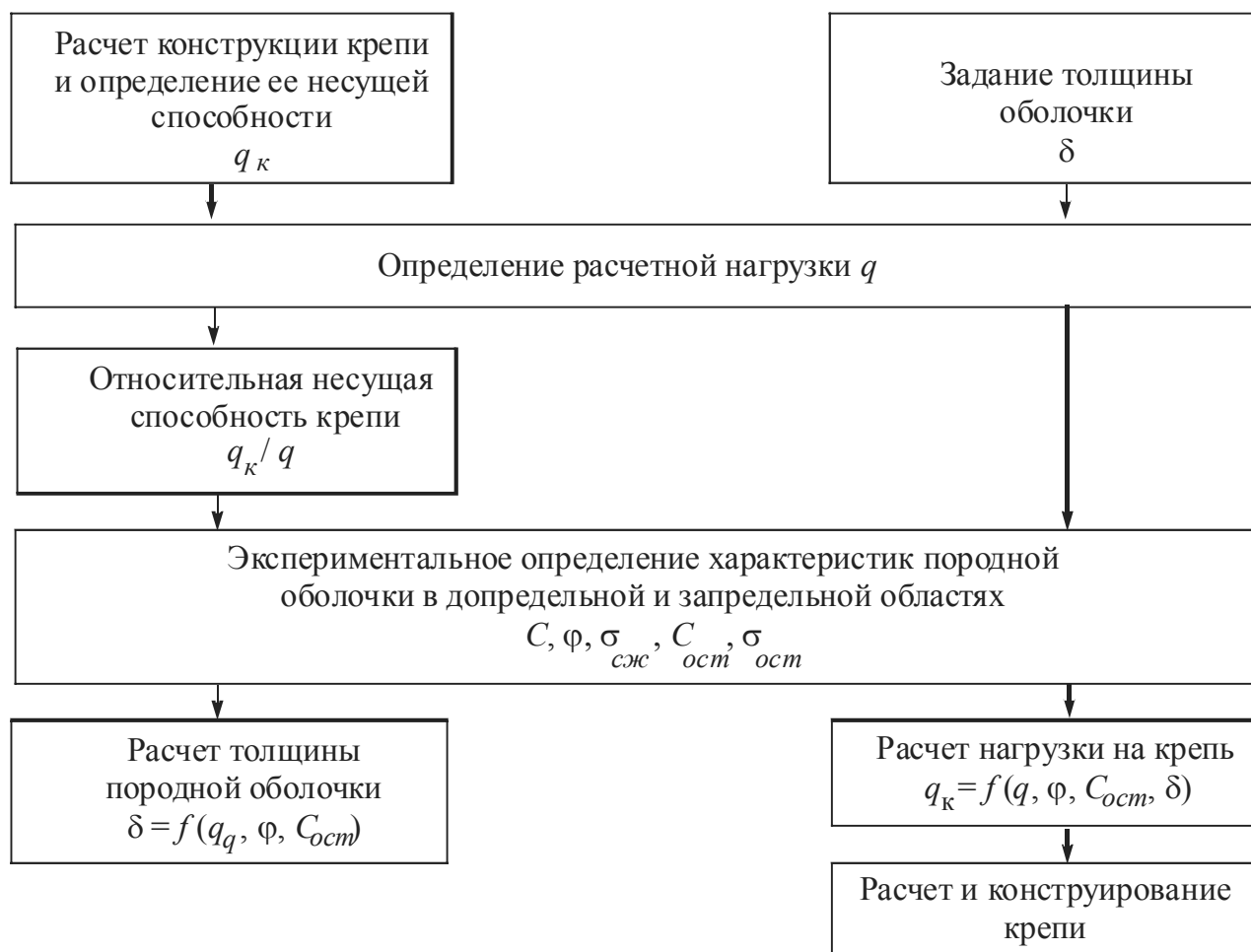


Рис. 7. Алгоритм расчета толщины δ породной оболочки в упруго-пластическом режиме:
 $C_{ост}, \sigma_{ост}$ – остаточные сцепление и предел прочности при сжатии

Если толщину породной оболочки δ считают известной, то определение расчетной нагрузки на крепь q_k выполняют в обратном порядке:

- задают толщину породной оболочки δ и определяют расчетную нагрузку q ;
- вводят расчетные характеристики прочности материала породной оболочки в

допредельной и запредельной стадиях;

– по специальным зависимостям определяют относительную нагрузку на крепь q_k/q и ее абсолютное значение q_k ;

– по величине q_k производят расчет и конструирование крепи.

Для проектирования технологии ЭХЗ обводненных неустойчивых глинистых грунтов необходимо определять следующие параметры: толщину оболочки из закрепленных пород; радиус распространения закрепляющего раствора; расстояние между электродами; плотность тока; напряжение на электродах; плотность и концентрацию компонентов закрепляющего раствора; продолжительность электрообработки грунта. Общий алгоритм проектирования основных технологических параметров ЭХЗ приведен на рис. 8.

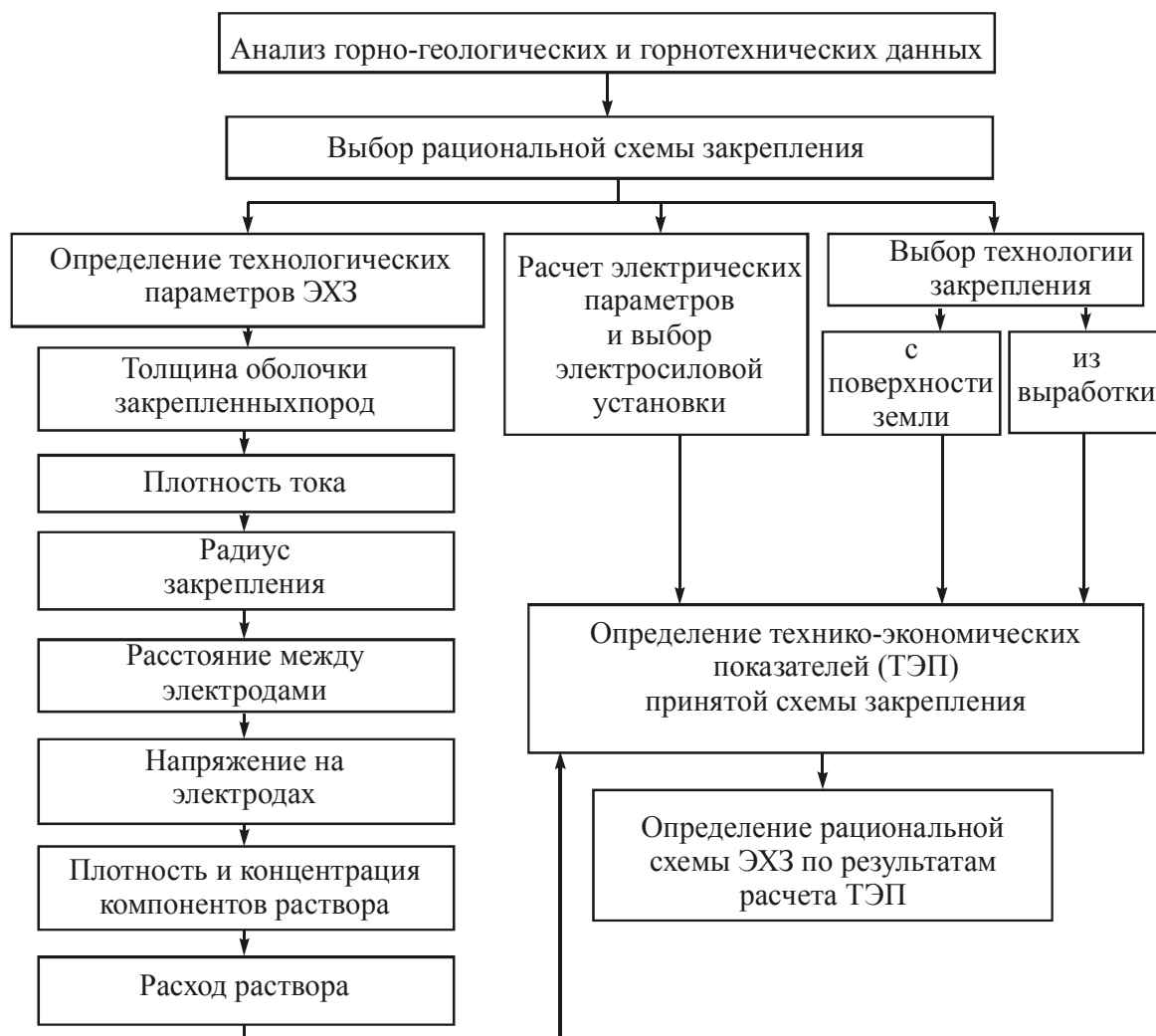


Рис. 8. Алгоритм проектирования ЭХЗ

Поскольку технология ЭХЗ является экспериментальной, при проектировании ЭХЗ целесообразно использовать опытно-расчетный метод. Так, радиус закрепления целесообразно определять опытным путем в натурных условиях или при моделировании электрохимической обработки грунта в лабораторных условиях. Удельный расход закрепляющего раствора в зависимости от пористости пород может достигать 350 л/м^3 . Пористость суглинков и глин в зависимости от их плотности может достигать 50 %, при этом коэффициент фильтрации составляет 10^{-6} – 10^{-7} м/с. Объем закрепляемого грунта вокруг выработки определяют по площади сечения закрепляемой зоны и длине заходки. При этом форма заходки зависит от выбранного расположения скважин (параллельно выработке или под углом к ее оси) и может принимать вид полого цилиндра или усеченного конуса.