

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**Е. Ю. Трацевская**

## **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ**

### **Методы статистической обработки результатов испытаний грунтов**

Практическое пособие  
для студентов специальности I-51 01 01  
«Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»  
специализации I-51 01 01 03  
«Инженерная геология и гидрогеология»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2019

УДК 624.131.3(076)

ББК 26.367.7я73

T65

**Рецензенты:**

кандидат технических наук В. В. Талецкий,  
кафедра геологии и географии учреждения образования «Гомельский  
государственный университет имени Франциска Скорины»

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Трацевская, Е. Ю.**

T65

Инженерно-геологические изыскания. Методы статистической обработки результатов испытаний грунтов : практическое пособие / Е. Ю. Трацевская ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 32 с.  
ISBN 978-985-577-547-9

В практическом пособии рассмотрены методы статистической обработки результатов испытаний грунтов. Полученные нормативные и расчетные показатели необходимы для составления расчетных схем грунтовых оснований сооружений, которые используются для прогноза устойчивости, величины и скорости их деформации.

Издание адресовано студентам специальности I – 51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», специализации I – 51 01 01 03 «Инженерная геология и гидрогеология», а также будет полезным специалистам в области инженерной геологии.

**УДК 624.131.3(076)**

**ББК 26.367.7я73**

**ISBN 978-985-577-547-9**

© Трацевская Е. Ю., 2019

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                    | 4  |
| 1 Сведения из теории.....                                                                                        | 6  |
| 2 Статистическая обработка экспериментальных данных.....                                                         | 10 |
| 3 Вычисление нормативных и расчетных значений характеристик грунтов, представленных одной величиной.....         | 19 |
| 4 Определение нормативных и расчетных значений удельного сцепления $C$ и угла внутреннего трения $\varphi$ ..... | 24 |
| Литература.....                                                                                                  | 29 |
| Приложение А. Статистические таблицы.....                                                                        | 30 |

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из целей инженерно-геологических исследований является характеристика грунтов для прогноза деформаций и оценки устойчивости зданий и сооружений. Массив грунтов будет охарактеризован, если будут выделены составляющие его инженерно-геологические элементы (ИГЭ) [2]. В пределах выделенных ИГЭ показатели состава, структуры и свойств обрабатываются методами математической статистики. На основе этих данных составляется расчетная схема основания сооружения, которая используется для прогноза устойчивости, величины и скорости деформации сооружения.

В зависимости от назначения различают классификационные и расчетные показатели. Показатели состава, строения и свойств грунтов, которые позволяют относить грунты к определенным классам, группам, типам и видам, называются *классификационными*. Для классификации несвязных грунтов используются в основном показатели, оценивающие структуру: гранулометрический состав, плотность, показатели пористости и др. Для классификации связных грунтов используются кроме параметров структуры (гранулометрический состав, пористость, число пластичности) также показатели вещественного состава (влажность, засоленность, содержание органических веществ) и др. [2]. *Расчетными* называют такие показатели свойств грунтов, которые необходимы инженерам-проектировщикам для расчета прогнозных значений деформации и коэффициентов устойчивости и водопроницаемости грунтов в основании или теле сооружения.

Требования к достоверности и надежности показателей физико-механических свойств грунтов изменяются в зависимости от стадии инженерных изысканий, типа и класса проектируемых сооружений. На стадии рекогносцировочных и предварительных исследований обычно достаточны обобщенные (нормативные) показатели. На стадиях детальных и дополнительных исследований кроме нормативных определяют расчетные показатели свойств грунтов. Расчетные значения определяются для характеристик, используемых в расчетах.

Применяемые для обработки показателей состава, структуры и свойств грунтов методы математической статистики базируются на единых принципах, которые изложены в нормативных документах, научной и учебной литературе.

Практические занятия по дисциплине «Инженерно-геологические изыскания» представляют собой весьма важную составную часть курса и имеют большое значение для всего цикла дисциплин специализации.

Использование настоящего практического пособия в учебном процессе поможет студентам выработать умение пользоваться нормативными документами, касающимися статистической обработки инженерно-геологической информации; овладеть техникой определения нормативных и расчетных показателей свойств грунтов, лучше понимать принципы построения расчетных схем оснований различных инженерных сооружений.

Издание состоит из четырех глав. В первой из них изложены основные теоретические положения. Во второй – приемы статистической обработки экспериментальных данных; в третьей описаны методы вычисления нормативных и расчетных значений характеристик грунтов, представленных одной величиной; последняя четвертая глава содержит указания, как определяются нормативные и расчетные значения удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ . В каждой главе рассматриваются примеры обработки информации. Все задания рассчитаны на 12 часов аудиторных занятий, задание на каждое практическое занятие определено в тексте практикума.

Практическое пособие подготовлено с использованием имеющейся нормативной, учебной и научной литературы, сведения о которой приведены в списке литературы.

Издание предназначено для студентов IV курса специальности I-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

# 1 СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Статистическую обработку результатов испытаний проводят для оценки неоднородности грунтов, выделения инженерно-геологических элементов (ИГЭ), вычисления нормативных и расчетных значений характеристик грунтов [1].

Для описанных в ГОСТе 20522-2012 [1] методов статистической обработки используют нормальный закон распределения вероятностей. Статистическую обработку проводят для частных значений характеристик грунтов, которые составляют случайную выборку. При наличии закономерного изменения характеристики в каком-либо направлении (чаще всего с глубиной) статистическую обработку проводят для определения параметров корреляционной зависимости, аппроксимирующей опытные точки линейной или кусочно-линейной функцией [1]. Опытные данные, для которых проводится статистическая обработка, должны быть получены единым методом испытания.

Статистическую обработку результатов испытаний выполняют для инженерно-геологического элемента (ИГЭ). За *инженерно-геологический элемент* принимают некоторый объем грунта одного и того же происхождения, подвида или разновидности при условии, что значения характеристик грунта изменяются в пределах элемента случайно (незакономерно) либо наблюдаемая закономерность такова, что ею можно пренебречь [1]. Предварительное разделение грунтов площадки строительства на ИГЭ производят с учетом возраста, происхождения, текстурно-структурных особенностей, номенклатурного вида. ИГЭ является основной инженерно-геологической единицей, для которой производят статистическую обработку характеристик грунтов, то есть определяют их нормативные и расчетные значения [1].

Если установлено, что изменение характеристик грунта незакономерно в плане и по глубине ИГЭ, переходят к вычислению нормативных и расчетных значений характеристик.

Для характеристики выделенного ИГЭ используют среднее значение, вычисленное из всех индивидуальных, которое называется *нормативным* значением показателя. Так как нормативное значение показателя характеризует ИГЭ с определенной достоверностью, в нормативные показатели вводят понижающие поправки, *коэффициенты безопасности*, величина которых зависит от ответственности сооружения и сложности инженерно-геологических условий. Нормативный показатель свойств с введенными поправками называется *расчетным*.

Нормативные значения характеристик определяют как средне-статистические. Расчетные значения получают делением нормативного значения на **коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$**  [1]. Коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$  должен устанавливаться с учетом изменчивости и числа определения характеристики при **заданной доверительной вероятности**. Значения доверительной вероятности принимают в соответствии с рекомендациями норм проектирования различных видов сооружений, и они должны быть указаны в техническом задании и программе работ на проведение инженерно-геологических изысканий.

При постепенном увеличении давления на фундамент обычного мелкого заложения, расположенный на песчаных или глинистых грунтах, его осадка примерно будет характеризоваться графиком, изображенным на рисунке 1. На графике видно, что по мере возрастания давления до определенного предела (точка I на рисунке 1) осадка фундамента развивается практически пропорционально действующему давлению, т. е. наблюдается их линейная зависимость. Именно такая зависимость позволяет применять при расчётах напряжений в горных породах под фундаментами и их осадок теорию линейно деформируемой среды [3]. Эту фазу деформации горных пород называют *фазой уплотнения* (отрезок *а* на рисунке 1). Под фундаментом в некоторой его области происходит преимущественно уплотнение грунтов, уменьшение их пористости, формируется уплотненное ядро.

При дальнейшем увеличении давления осадка фундамента становится неравномерной, нарастает быстрее, чем увеличивается давление. Нарушается пропорциональность осадки возрастающей нагрузке (рисунок 1, отрезок *б*). Это указывает на начало разрушения грунтов, образование локальных сдвигов у краев фундамента. Формируются остаточные пластические деформации, которые постепенно охватывают все большую и большую область под фундаментом вокруг уплотненного ядра. Эту фазу деформаций грунтов называют *фазой сдвигов* (рисунок 1, отрезок *б*).

К концу фазы сдвигов (точка II на рисунке 1) сдвиги в отдельных точках сливаются в некоторую сплошную поверхность скольжения, и подготавливается наступление третьей фазы – *выпора грунтов из-под фундамента*, т. е. *полное их разрушение*. Это фаза выпирания (рисунок 1, отрезок *в*). Критическую нагрузку, соответствующую точке II на рисунке 1, называют **несущей способностью пород**.

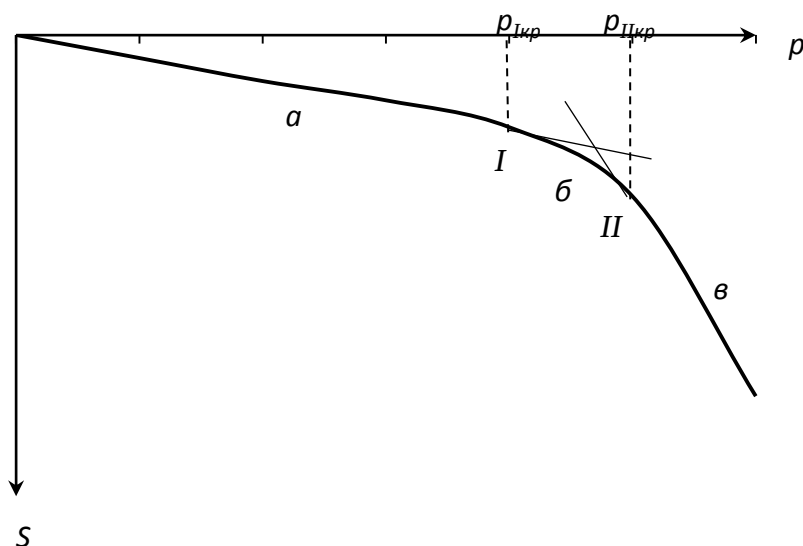


Рисунок 1 – График развития осадки фундамента по мере возрастания нагрузки [3]

Основания зданий и сооружений должны рассчитываться по двум группам предельных состояний: **по первому предельному состоянию, т. е. по несущей способности** (по прочности), соответствующей второй критической нагрузке (точка II на рисунке 1); **по второму предельному состоянию, т. е. по деформациям** (по осадкам, просадкам и др.) (точка I на рисунке 1) [5].

При расчете оснований зданий и сооружений по предельным состояниям их осадка не должна превышать допустимых значений, а несущая способность грунтов должна гарантировать их устойчивость, сохранность и нормальные условия эксплуатации. Расчет оснований по деформациям является обязательным для всех сооружений, расчет по несущей способности выполняется в следующих случаях [5]:

- а) если на основание передаются значительные горизонтальные нагрузки (подпорные стены, фундаменты распорных конструкций и т.п.);
- б) если сооружение расположено на откосе или крутопадающем склоне;
- в) если основание сложено слабыми медленно уплотняющимися водонасыщенными пылевато-глинистыми и биогенными грунтами;
- г) если основание сложено скальными грунтами.

**Доверительным интервалом** называют интервал, вычисленный по выборочным данным, который с **заданной доверительной вероятностью** покрывает неизвестное истинное значение оцениваемого параметра распределения [1]. **Доверительная вероятность** – это ве-

роятность того, что доверительный интервал накроет неизвестное истинное значение параметра, оцениваемого по выборочным данным. Вероятность того, что неизвестное истинное значение параметра не выйдет за пределы нижней (или верхней) границы доверительного интервала, отвечает *односторонней доверительной вероятности*. *Доверительная вероятность расчетных значений характеристик грунтов  $\alpha$  при оценке оснований по несущей способности принимается  $\alpha_I = 0,95$ , по деформациям –  $\alpha_{II} = 0,85$  [5].*

*Число степеней свободы* определяется как число независимых определений, равное числу определений  $n$  характеристики минус число оцениваемых статистических параметров.

## 2 СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обработка экспериментальных данных для каждого выделенного ИГЭ сводится к следующим операциям [7]:

- 1) составление графиков рассеяния для частных значений показателя;
- 2) проверка нормальности распределения значений частных показателей в выборке;
- 3) вычисление среднего значения, среднего квадратического отклонения и коэффициента изменчивости значений показателя;
- 4) определение значений показателей, не характерных для данной выборки;
- 5) вычисление обобщенных значений показателей (после исключения нехарактерных значений);
- 6) установление поправок к обобщенному значению показателя.

*Составление графиков рассеяния для частных значений показателя.* Результаты определения исследуемой характеристики могут быть представлены в виде таблицы. При этом они не обладают достаточной наглядностью, а при большом количестве наблюдений их анализ затруднен. Поэтому результаты исследований представляют также в виде графиков. Наиболее простой – **график рассеяния**, имеющий одну числовую ось, по которой в масштабе точками наносят значения характеристики. По другой оси точки могут распределяться произвольно.

Более наглядна – **гистограмма распределения**. Для получения гистограммы числовую горизонтальную ось графика разбивают на 5–12 равных классов. Минимальное их число  $l$  можно найти по формуле Стерджесса [7]:

$$l = 1 + 3,22 \lg n, \quad (1)$$

где  $n$  – число определений.

В каждом классе, за исключением крайних, должно быть не менее 3–5 точек. При меньшем числе классов уменьшается точность дальнейших вычислений, при большем – увеличивается их трудоемкость.

Величина классового интервала  $i$  определяется по формуле [7]:

$$i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{l}, \quad (2)$$

где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения классового интервала.

Число точек  $n$ , попадающих в класс, называется частотой класса. Сумма частот  $n$  равна общему числу определений  $n$ . Для облегчения работы с выборками разного объема используют частоту  $p$ , представляющую отношение частоты  $n$  к общему объему выборки  $n$ . Частоты выражаются в долях единицы, их сумма равна 1. По полученным данным строят график, имеющий вид ступенек одинаковой ширины, равной ширине классов, и разной высоты, равной частоте класса. Полученный график называется гистограммой распределения. Если частоты отмечать отрезками перпендикуляров, восстановленных из центров классов, то, соединив отрезки, **получим полигон распределения**.

Однако сравнение гистограмм при различной ширине классовых интервалов затруднено. Поэтому в ряде случаев удобно по оси ординат откладывать суммы частотей данного и предыдущего классов – накопленные частоты. Полученный ступенчатый график называется **кумулята**, или кумулятивная кривая распределения.

Основными числовыми характеристиками распределения являются: среднее значение показателя  $\bar{X}$ , коэффициент асимметрии  $A$  и эксцесс  $E$ , а также медиана  $X_{Me}$  и мода  $X_{Mo}$ .

**Среднее арифметическое значение  $\bar{X}$**  определяют по формуле [1]:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (3)$$

где  $x_i$  – частные значения характеристики;  
 $n$  – число определений характеристики.

**Коэффициент асимметрии  $A$**  характеризует степень скошенности кривой распределения (рисунок 2); вычисляется по формуле [4]:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{X}^3}{nS^3}, \quad (4)$$

При  $A = 0$  распределение считается нормальным, при  $A > 0$  – правосторонняя асимметрия, при  $A < 0$  – левосторонняя асимметрия. Если асимметрия более 0,5, то независимо от знака она считается значительной. Если асимметрия меньше 0,25, то она считается незначительной.

Для оценки существенности асимметрии вычисляют показатель средней квадратической ошибки коэффициента асимметрии  $S_A$ :

$$S_A = \sqrt{\frac{6}{n-2} \frac{n-1}{n+1} \frac{n}{n+3}} \quad (5)$$

Если отношение  $\frac{A}{S_A}$  имеет значение больше 2, то это свидетельствует о существенном характере асимметрии.

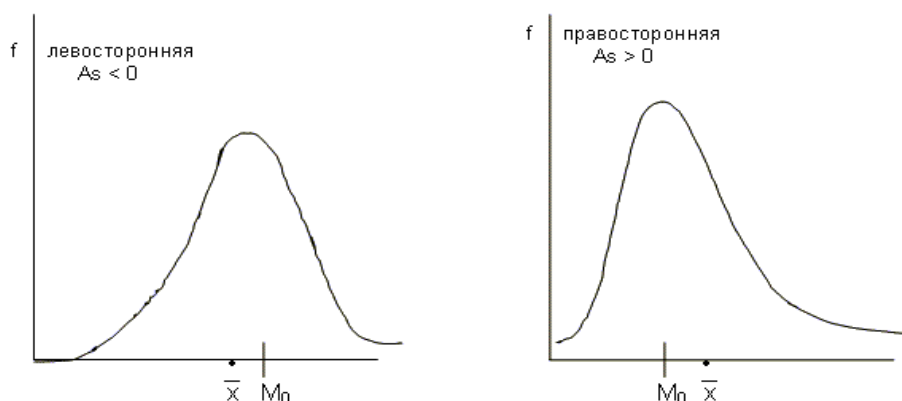


Рисунок 2 – Характер асимметричности кривой распределения

**Экссесс  $E$**  дает представление о степени крутости кривой распределения (рисунок 3). Он представляет собой отклонение вершины эмпирического распределения вверх или вниз («крутость») от вершины кривой нормального распределения. Для определения эксцесса используют формулу [4]:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{X}}{nS^4} - 3, \quad (6)$$



Рисунок 3 – Характер эксцесса кривой распределения

Если  $E > 0$ , то эксцесс распределения – высоковершинный, при  $E < 0$  – низкововершинный, при  $E = 0$  – нормальное распределение.

Для оценки существенности эксцесса вычисляют показатель его средней квадратической ошибки  $S_E$ :

$$S_E = \sqrt{\frac{24n}{n-1} \frac{n-2}{n+3} \frac{n-3}{n+5}}, \quad (7)$$

Если отношение  $\frac{E}{S_E}$  имеет значение больше 3, то это свидетельствует о существенном характере эксцесса.

**Среднеквадратическое отклонение характеристики  $S$**  вычисляется по формуле [1]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{x=1}^n X_n - x_i^2}, \quad (8)$$

Среднее квадратическое отклонение показывает, как велик разброс точек около среднего арифметического (выражается в абсолютных единицах).

Главными причинами появления «отскоков» являются: а) ошибки (чаще – случайные) при полевом и лабораторном определении показателя; б) наличие в пределах выделенного ИГЭ прослая, линзы грунтов, резко отличающихся по своим свойствам от всего ИГЭ; в) неправильное выделение ИГЭ (ошибка в построении модели).

**Медианой** называется значение показателя  $X_{Me}$ , расположенное посередине вариационного ряда. Медиану находят графически.

**Мода** – это наиболее часто встречающееся значение признака.

При нормальном симметричном распределении нормативное  $X_n$  (среднее  $\bar{X}$ ) значение показателя совпадает с медианой  $X_{Me}$  и модой  $X_{Mo}$ :

$$X_n = \bar{X} = X_{Me} = X_{Mo}, \quad (9)$$

Средние значения показателя будут характерными для выборки тогда, когда частные значения имеют нормальное распределение или близкое к нему. Нормальность распределения устанавливается визуально по кривой распределения или с помощью формул математической статистики. Кривая нормального распределения характеризуется одной вершиной и симметрично расположенными ветвями. В пределах одного ИГЭ распределение носит, как правило, нормальный ха-

рактар, а рэдка сустракаюцца адхіленні добра адрозніваюцца візуальна.

### Прымер.

В табліцы 1 прыведзены значэнні шчыльнасці часціц  $\rho_s$  пяска аллювіальнага  $aQ_3$ , распаўсюджанага на тэрыторыі г. Гомеля.

Для пабудовы графіка рассяння вызначым лік класоў  $l$  і велічыню іх інтэрвалаў  $i$  па формулам (1) і (2) пры  $n = 30$ :

$$l = 1 + 3,22 \lg n = 1 + 3,22 \lg 30 \approx 8,$$

$$i = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{l} = \frac{2,70 - 2,63}{8} \approx 0,01.$$

Табліца 1 – Вынікі вызначэння шчыльнасці часціц глебы  $\rho_s$

| № п/п | $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> | № п/п | $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> | № п/п | $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> |
|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|
| 1     | 2,68                         | 11    | 2,63                         | 21    | 2,65                         |
| 2     | 2,70                         | 12    | 2,64                         | 22    | 2,66                         |
| 3     | 2,66                         | 13    | 2,65                         | 23    | 2,64                         |
| 4     | 2,67                         | 14    | 2,65                         | 24    | 2,68                         |
| 5     | 2,65                         | 15    | 2,66                         | 25    | 2,69                         |
| 6     | 2,67                         | 16    | 2,66                         | 26    | 2,65                         |
| 7     | 2,65                         | 17    | 2,66                         | 27    | 2,66                         |
| 8     | 2,66                         | 18    | 2,67                         | 28    | 2,64                         |
| 9     | 2,63                         | 19    | 2,64                         | 29    | 2,69                         |
| 10    | 2,67                         | 20    | 2,64                         | 30    | 2,68                         |

Мінімальнае значэнне шчыльнасці часціц  $\rho_s$  сутэсна адрозніваецца ад нуля, таму пачынаем «разбіўку» лікавой восі з гэтага значэння ( $x_{\min} = 2,63$  г/см<sup>3</sup>). Графік рассяння значэнняў шчыльнасці часціц глебы  $\rho_s$  прыведзены ў выглядзе табліцы 2.

Табліца 2 – Графік рассяння значэнняў шчыльнасці часціц глебы  $\rho_s$

| Інтэр-вал | Графік рассяння | Частота, $n$ | Накопленая частота | Частасьць, $p$ | Накопленая частасьць |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|----------------|----------------------|
| 2,63      | ++              | 2            | 2                  | 0,07           | 0,07                 |
|           | +++++           | 5            | 7                  | 0,17           | 0,24                 |
| 2,65      | ++++++          | 6            | 13                 | 0,20           | 0,44                 |
|           | +++++++         | 7            | 20                 | 0,23           | 0,67                 |
| 2,67      | ++++            | 4            | 24                 | 0,13           | 0,80                 |
|           | +++             | 3            | 27                 | 0,10           | 0,90                 |
| 2,69      | ++              | 2            | 29                 | 0,07           | 0,97                 |
|           | +               | 1            | 30                 | 0,03           | 1,00                 |

Для рассматриваемого примера гистограмма и полигон распределения показаны на рисунке 4, а кумулятивная кривая распределения – на рисунке 5.

Среднее значение плотности частиц грунта, определяемое по формуле (3),

$$\bar{\rho}_s = \frac{\sum \rho_i}{n} = \frac{79,78}{30} = 2,65 \text{ г/см}^3$$

Для того чтобы найти коэффициент асимметрии  $A$  и эксцесс  $E$ , необходимо определить среднеквадратическое отклонение  $S$ . Вначале составим вспомогательную таблицу 3, а затем по формуле (8) вычислим среднеквадратическое отклонение  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n X_n - x_i^2} = \sqrt{\frac{0,0120}{29}} = 0,020.$$

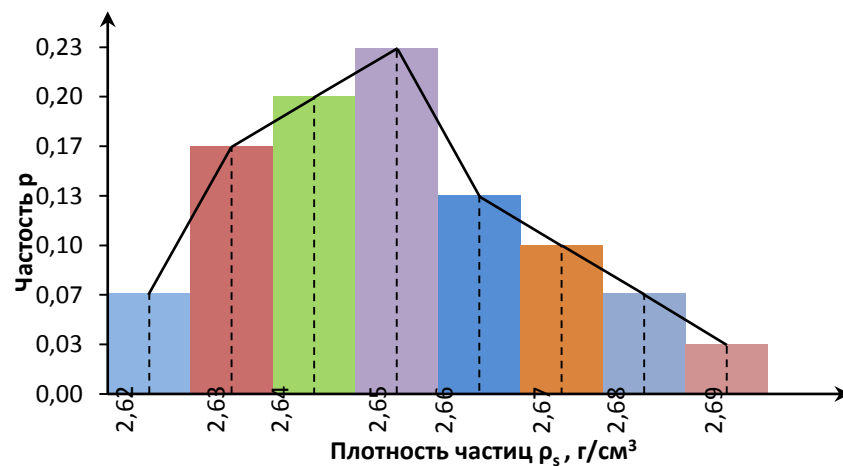


Рисунок 4 – Гистограмма и полигон распределения значений плотности частиц грунта  $\rho_s$

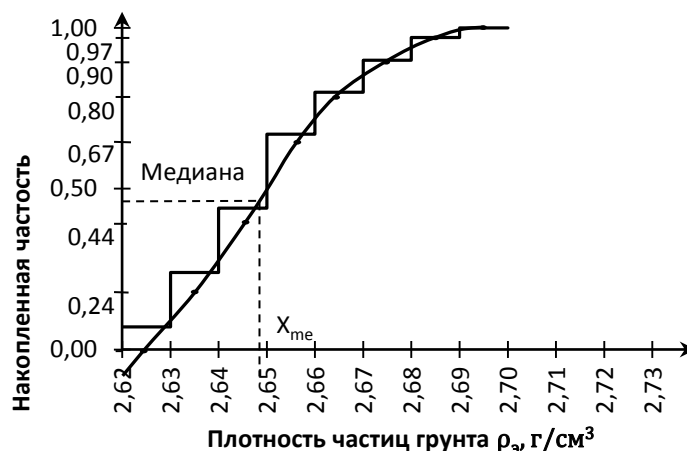


Рисунок 5 – Кумулята значений плотности частиц грунта  $\rho_s$

Таблица 3

| $\rho_i$         | $\rho_i - \rho$ | $(\rho_i - \rho)^2$ | $(\rho_i - \rho)^3$ | $(\rho_i - \rho)^4$   |
|------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 2,68             | +0,03           | 0,0009              | +0,000027           | 0,00000081            |
| 2,70             | +0,05           | 0,0025              | +0,000125           | 0,00000625            |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,67             | +0,02           | 0,0004              | +0,000008           | 0,00000016            |
| 2,65             | +0,00           | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,67             | +0,02           | 0,0004              | +0,000008           | 0,00000016            |
| 2,65             | 0               | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,63             | -0,02           | 0,0004              | -0,000008           | 0,00000016            |
| 2,67             | +0,02           | 0,0004              | +0,000008           | 0,00000016            |
| 2,63             | -0,02           | 0,0004              | -0,000008           | 0,00000016            |
| 2,64             | -0,01           | 0,0001              | -0,000001           | 0,00000001            |
| 2,65             | 0               | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,65             | 0               | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,67             | +0,02           | 0,0002              | +0,000008           | 0,00000016            |
| 2,64             | -0,01           | 0,0001              | -0,000001           | 0,00000001            |
| 2,64             | -0,01           | 0,0001              | -0,000001           | 0,00000001            |
| 2,65             | 0               | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,64             | -0,01           | 0,0001              | -0,000001           | 0,00000001            |
| 2,68             | +0,03           | 0,0009              | +0,000027           | 0,00000081            |
| 2,69             | +0,04           | 0,0016              | +0,000064           | 0,00000256            |
| 2,65             | 0               | 0                   | 0                   | 0                     |
| 2,66             | +0,01           | 0,0001              | +0,000001           | 0,00000001            |
| 2,64             | -0,01           | 0,0001              | -0,000001           | 0,00000001            |
| 2,69             | +0,04           | 0,0016              | +0,000064           | 0,00000265            |
| 2,68             | +0,03           | 0,0009              | +0,000027           | 0,00000081            |
| $\Sigma = 79,78$ |                 | $\Sigma = 0,0120$   | $\Sigma = 0,000352$ | $\Sigma = 0,00001488$ |

Находим коэффициент асимметрии  $A$ , эксцесс  $E$  и их средние квадратические ошибки соответственно  $S_A$  и  $S_E$  по формулам (4)–(7).

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{X}}{nS^3} = \frac{0,000352}{30 \times 0,000008} = 1,47,$$

$$S_A = \sqrt{\frac{6}{n-2} \frac{n-1}{n+1} \frac{n}{n+3}} = \sqrt{\frac{6 \times 29 \times 30}{28 \times 31 \times 33}} = 0,43,$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{X}}{nS^4} - 3 = \frac{0,00001487}{30 \times 0,00000016} - 3 = -3,$$

$$S_E = \sqrt{\frac{24n}{n-1} \frac{n-2}{n+3} \frac{n-3}{n+5}} = \sqrt{\frac{24 \times 30 \times 28 \times 27}{29^2 \times 33 \times 35}} = 0,75.$$

**Вывод.** Как показано на рисунках 4 и 5,  $\rho_{sMe} = 2,66 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{sMo} = 2,66 \text{ г/см}^3$  (таблица 1). Распределение значений частных показателей плотности частиц грунта  $\rho_s$  в выборке можно считать нормальным и симметричным, так как в соответствии с формулой (9)  $X_n \approx X_{Me} = X_{Mo}$ .

С другой стороны, так как  $A > 0,5$  то асимметрия считается значительной, в то же время отношение  $\frac{A}{S_A} < 2$  свидетельствует о несущественном характере асимметрии. Коэффициент асимметрии  $A > 0$ , значит симметрия правосторонняя. Эксцесс  $E < 0$ , и  $l = \frac{E}{S_E} < 3$ , следовательно, эксцесс распределения низковоершинный и несущественный.

### Задание 1 (4 часа).

1 Составить график рассеяния для частных значений плотности грунта  $\rho_i$  по определенному варианту (таблица 4).

2 Построить гистограмму распределения значений плотности грунта, полигон распределения, кумулятивную кривую распределения. Определить значения медианы и моды. Проверить выборку на асимметрию и эксцесс.

3 По результатам проверки сделать вывод о нормальности распределения значений частных показателей плотности грунта  $\rho_i$  в выборке.

Таблица 4 – Значения плотности грунта ( $\rho_i$ ,  $\text{г/см}^3$ ) по вариантам

| Варианты заданий |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1                | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| 1,72             | 1,65 | 1,81 | 1,66 | 1,72 | 1,81 | 1,63 | 1,67 |
| 1,81             | 1,66 | 1,82 | 1,72 | 1,80 | 1,98 | 1,59 | 1,67 |
| 1,73             | 1,67 | 1,84 | 1,71 | 1,73 | 1,90 | 1,52 | 1,64 |

Окончание таблицы 4

| 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,78 | 1,64 | 1,77 | 1,72 | 1,78 | 1,97 | 1,61 | 1,85 |
| 1,71 | 1,63 | 1,80 | 1,66 | 1,62 | 1,93 | 1,62 | 1,68 |
| 1,64 | 1,67 | 1,72 | 1,69 | 1,64 | 1,74 | 1,72 | 1,58 |
| 1,72 | 1,64 | 1,71 | 1,71 | 1,60 | 1,89 | 1,61 | 1,64 |
| 1,75 | 1,65 | 1,76 | 1,79 | 1,63 | 1,92 | 1,65 | 1,62 |
| 1,80 | 1,79 | 1,75 | 1,68 | 1,52 | 1,95 | 1,65 | 1,66 |
| 1,84 | 1,63 | 1,76 | 1,58 | 1,67 | 1,92 | 1,65 | 1,71 |
| 1,57 | 1,59 | 1,72 | 1,64 | 1,57 | 1,96 | 1,69 | 1,79 |
| 1,89 | 1,52 | 1,75 | 1,62 | 1,60 | 1,93 | 1,56 | 1,75 |
| 1,98 | 1,61 | 1,72 | 1,66 | 1,45 | 1,97 | 1,63 | 1,72 |
| 1,61 | 1,62 | 1,82 | 1,71 | 1,61 | 1,99 | 1,58 | 1,80 |
| 1,98 | 1,72 | 1,69 | 1,60 | 1,88 | 2,01 | 1,73 | 1,72 |
| 2,00 | 1,67 | 1,74 | 1,62 | 1,73 | 1,89 | 1,68 | 1,71 |
| 1,70 | 1,82 | 1,79 | 1,65 | 1,66 | 2,00 | 1,79 | 1,72 |
| 1,55 | 1,80 | 1,65 | 1,71 | 1,49 | 2,01 | 1,71 | 1,66 |
| 1,87 | 1,72 | 1,70 | 1,69 | 1,71 | 1,85 | 1,69 | 1,69 |
| 1,80 | 1,80 | 1,68 | 1,56 | 1,80 | 1,84 | 1,66 | 1,63 |
| 1,64 | 1,72 | 1,66 | 1,63 | 1,84 | 1,95 | 1,72 | 1,59 |
| 1,54 | 1,71 | 1,68 | 1,55 | 1,69 | 2,01 | 1,71 | 1,57 |
| 1,71 | 1,71 | 1,71 | 1,73 | 1,78 | 1,79 | 1,71 | 1,61 |
| 1,68 | 1,69 | 1,71 | 1,68 | 1,74 | 1,86 | 1,79 | 1,62 |

### 3 ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ОДНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ

Для исключения возможных ошибок, оставшихся после анализа опытных данных, выполняют статистическую проверку на однородность выборки. Исключают то частичное (максимальное или минимальное) значение  $x_i$ , для которого выполняется условие [1]:

$$X_n - x_i > \nu S, \quad (10)$$

где  $X_n$  – нормативное значение характеристики грунта, определяется по формуле (4);

$\nu$  – статистический критерий, принимаемый в зависимости от числа определений  $n$  характеристики по таблице А.1 Приложения А;

$S$  – среднеквадратическое отклонение характеристики, определяется по формуле (6).

Для проверки необходимости дополнительного разделения предварительно выделенного ИГЭ на два новых элемента вычисляют значение критерия  $t$  по формуле:

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2 - 2}}, \quad (11)$$

где  $\bar{X}_1$  и  $\bar{X}_2$  – среднеарифметические значения характеристики в двух новых ИГЭ;

$S_1$  и  $S_2$  – соответствующие им среднеквадратические отклонения;

$n_1$  и  $n_2$  – число определений характеристики в каждом новом элементе.

Для проверки возможности объединения двух ИГЭ в один вычисляют значения критериев  $t$  и  $F$  по формулам (11) и (12) [1]:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (12)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – то же, что и в формуле (11), при этом в числитель подставляют большее из значений  $S_1$  и  $S_2$ .

Дополнительное разделение ИГЭ необходимо, если  $t \geq t_\alpha$ . Два ИГЭ объединяют в один, если одновременно выполняется условие  $F < F_\alpha$  и  $t < t_\alpha$  [1].

Значение  $t_\alpha$  принимают по таблице А.1 Приложения А при двусторонней доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  для числа степеней свободы  $K = n_1 + n_2 - 2$ .

Значение  $F_\alpha$  принимают по таблице А.3 Приложения А при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  для числа степеней свободы  $K_1 = n_1 - 1$ ,  $K_2 = n_2 - 1$ .

Обычно при обработке инженерно-геологической информации помимо среднего арифметического  $\bar{X}$  и нормативного  $X_n$  значений, а также среднего квадратического отклонения  $S$  ограничиваются ниже следующими показателями.

**Коэффициент вариации**, показывающий степень разброса точек в выборке по сравнению со средним арифметическим значением (выражается в процентах или долях единицы):

$$V = \frac{S}{\bar{X}_n}. \quad (13)$$

**Показатель погрешности среднего значения характеристики (1):**

$$\hat{\rho}_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \quad (14)$$

где  $t_\alpha$  – коэффициент, принимаемый по таблице А.2 Приложения А в зависимости от заданной односторонней доверительной вероятности  $\alpha$  и числа степеней свободы  $K = n - 1$ .

Коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$  вычисляют по формуле:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_\alpha} \quad (15)$$

В отдельных расчетах перед величиной  $\rho_\alpha$  может быть принят знак плюс, чтобы обеспечивалась большая надежность основания или сооружения.

Расчетное значение характеристики грунта вычисляют по формуле:

$$X = \frac{X_n}{\gamma_g} \quad (16)$$

### **Пример.**

Вычислить нормативное и расчетные значения плотности  $\rho$  глинистого грунта для данного в таблице 5 вариационного ряда при  $n = 11$ .

Решение. В соответствии с формулами (3), (8) и (13):

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{n} = \frac{22,33}{11} = 2,03 \text{ г/см}^3,$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{\rho} - \rho_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,4868}{10}} = 0,220636,$$

$$V = \frac{\sigma}{\rho_n} = \frac{0,221}{2,03} = 0,109.$$

Определяем по таблице А.2 Приложения А  $t_{\alpha}$ ; при  $n = 11$  и  $\alpha = 0,95$  (расчет оснований по несущей способности)  $t_{\alpha_I} = 1,81$ ; при  $n = 11$  и  $\alpha = 0,85$  (расчет оснований по деформациям)  $t_{\alpha_{II}} = 1,10$ .

Таблица 5 – Вариационный ряд значений плотности грунта  $\rho_i$ , г/см<sup>3</sup>

| $\rho_i$         | $\bar{\rho} - \rho_i$ | $(\bar{\rho} - \rho_i)^2$ |
|------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2,00             | +0,03                 | 0,0009                    |
| 2,04             | -0,01                 | 0,0001                    |
| 2,23             | -0,20                 | 0,0400                    |
| 2,16             | -0,13                 | 0,0169                    |
| 2,19             | -0,16                 | 0,0256                    |
| 1,60             | +0,43                 | 0,1849                    |
| 1,89             | +0,14                 | 0,0196                    |
| 2,20             | -0,17                 | 0,0289                    |
| 2,30             | -0,27                 | 0,0729                    |
| 1,72             | +0,31                 | 0,0961                    |
| 2,00             | +0,03                 | 0,0009                    |
| $\Sigma = 22,33$ |                       | $\Sigma = 0,4868$         |

В соответствии с формулами (14), (15) и (16) находим:

$$\hat{\rho}_I = \frac{t_{\alpha_I} V}{\sqrt{n}} = \frac{1,81 \times 0,109}{3,32} = 0,059;$$

$$\hat{\rho}_{II} = \frac{t_{\alpha_{II}} V}{\sqrt{n}} = \frac{1,10 \times 0,109}{3,32} = 0,036;$$

$$\gamma_{g_I} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{\alpha_I}} = \frac{1}{1 - 0,059} = 1,063;$$

$$\gamma_{gII} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{aII}} = \frac{1}{1 - 0,036} = 1,037;$$

$$\rho_I = \frac{\rho_n}{\gamma_{gI}} = \frac{2,03}{1,063} = 1,91,$$

$$\rho_{II} = \frac{\rho_n}{\gamma_{gII}} = \frac{2,03}{1,037} = 1,96.$$

**Вывод:** нормативное значение плотности  $\rho_n = 2,03 \text{ г/см}^3$ ; в расчетах по несущей способности грунтов плотность  $\rho_I = 1,91 \text{ г/см}^3$ ; по деформациям –  $\rho_{II} = 1,96 \text{ г/см}^3$ .

### **Задание 2 (4 часа).**

1) Выполнить статистическую проверку на однородность выборки данного в таблице 4 вариационного ряда плотности  $\rho$  песка мелкого в соответствии с заданным вариантом. Исключить возможные ошибки, оставшиеся после анализа опытных данных, и получить однородную выборку.

2) Проверить необходимость дополнительного деления предварительно выделенного ИГЭ на два новых элемента. В качестве критерия деления одного ИГЭ на два принять разновидность песчаного грунта, определенную по коэффициенту пористости  $e$  в соответствии с таблицей 6. Коэффициент пористости  $e$  рассчитывается по формулам:

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad (17)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 - \omega}, \quad (18)$$

где  $\rho_s$  – плотность частиц грунта,  $\text{г/см}^3$ ;

$\rho_d$  – плотность сухого грунта,  $\text{г/см}^3$ ;

$\omega$  – естественная влажность грунта, доли ед.

Для всех вариантов принять плотность частиц грунта  $\rho_s = 2,65 \text{ г/см}^3$ ; естественную влажность  $\omega = 0,10$ .

Таблиц 6 – Разновидности песка по коэффициенту пористости  $e$  [6]

| Вид песчаного грунта                    | Коэффициент пористости<br>$e$ | Разновидность<br>песчаных грунтов<br>по плотности |
|-----------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Гравелистый, крупный, средней крупности | $e < 0,55$                    | Плотный                                           |
|                                         | $0,55 \leq e \leq 0,70$       | Средней плотности                                 |
|                                         | $e > 0,70$                    | Рыхлый                                            |
| Мелкий                                  | $e < 0,60$                    | Плотный                                           |
|                                         | $0,60 \leq e \leq 0,75$       | Средней плотности                                 |
|                                         | $e > 0,75$                    | Рыхлый                                            |
| Пылеватый                               | $e < 0,60$                    | Плотный                                           |
|                                         | $0,60 \leq e \leq 0,80$       | Средней плотности                                 |
|                                         | $e > 0,80$                    | Рыхлый                                            |

3) Проверить возможность объединения двух ИГЭ в один. Для этого необходимо выбрать два ИГЭ с одинаковой характеристикой по коэффициенту пористости  $e$  при сравнении заданий двух вариантов – первого и второго; третьего и четвертого; пятого и шестого; седьмого и восьмого.

4) Вычислить нормативное и расчетные значения плотности  $\rho$  песчаного грунта для вновь образованного вариационного ряда.

## 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УДЕЛЬНОГО СЦЕПЛЕНИЯ $c$ И УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ $\varphi$

Для определения нормативных значений удельного сцепления  $C_n$  и угла внутреннего трения  $\varphi_n$  обработку результатов опытов проводят вычислением по методу наименьших квадратов прямолинейной зависимости вида (рисунок 6):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (19)$$

где  $\tau$  – сопротивление грунта срезу, Мпа;

$\sigma$  – нормальное напряжение, Мпа;

$\operatorname{tg} \varphi$  – тангенс угла внутреннего трения;

$C$  – удельное сцепление, Мпа.

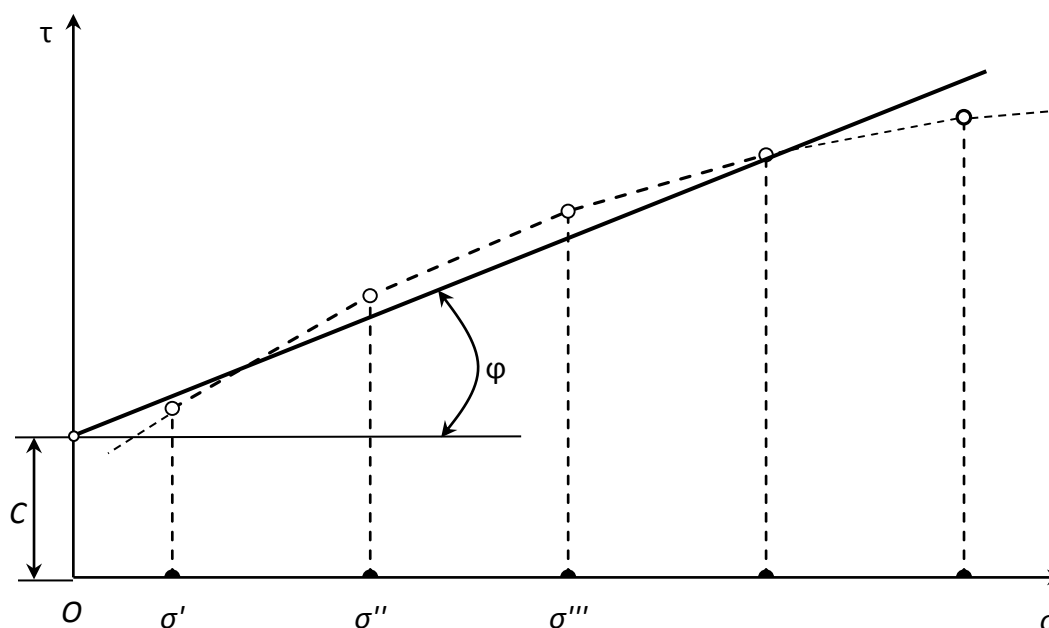


Рисунок 6 – График сдвига

Нормативные значения  $\operatorname{tg} \varphi_n$  и  $C_n$  вычисляют по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{n \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \sigma_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}, \quad (20)$$

$$C_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}, \quad (21)$$

где  $\tau_i$  и  $\sigma_i$  – частные значения, которые соответствуют сопротивлению срезу и нормальному напряжению;

$n$  – число определений величины  $\tau$ .

Если при этом получится значение  $C_n < 0$ , то принимают  $C_n = 0$ , а  $\operatorname{tg} \varphi_n$  вычисляют по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}. \quad (22)$$

Вычисляют для  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $C$  коэффициент вариации  $V$ , коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$  и их расчетные значения по формулам (13), (14) и (15). Показатель точности оценки среднего значения характеристики  $\rho_\alpha$  определяют по формуле

$$\hat{\rho}_\alpha = t_\alpha V. \quad (23)$$

Средние квадратические отклонения соответственно равны:

$$S_c = S_\tau \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}, \quad (24)$$

$$S_{\operatorname{tg} \varphi} = S_\tau \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}. \quad (25)$$

Среднеквадратическое отклонение сопротивления срезу  $S_\tau$  вычисляют по формуле [1]:

$$S_\tau = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_n + C_n - \tau_i^2}. \quad (26)$$

В формуле (26) следует заменить  $n - 2$  на  $n - 1$ , если принято  $C_n = 0$ , а  $\operatorname{tg} \varphi_n$  вычислен по формуле (20).

**Пример.**

Вычислить нормативные и расчетные значения удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  песка мелкого. Значения сопротивления срезу  $\tau_i$  при соответствующих значениях нормального напряжения  $\sigma_i$  приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Пример заполнения таблицы

| $\sigma_i$ , МПа | $\tau_i$ , МПа | $\sigma_i \tau_i$ | $\sigma_i^2$ | $\sigma_i \operatorname{tg} \varphi_n$ | $(\sigma_i \operatorname{tg} \varphi_n + C_n - \tau_i)^2$ |
|------------------|----------------|-------------------|--------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 0,1              | 0,075          | 0,0075            | 0,01         | 0,0638                                 | 0,00000484                                                |
| 0,2              | 0,130          | 0,0260            | 0,04         | 0,1276                                 | 0,00004356                                                |
| 0,3              | 0,200          | 0,0600            | 0,09         | 0,1914                                 | 0,00000016                                                |
| 0,1              | 0,075          | 0,0075            | 0,01         | 0,0638                                 | 0,00000484                                                |
| 0,2              | 0,135          | 0,0270            | 0,04         | 0,1276                                 | 0,00000256                                                |
| 0,3              | 0,205          | 0,0615            | 0,09         | 0,1914                                 | 0,00002116                                                |
| $\Sigma = 1,2$   | 0,82           | 0,1895            | 0,28         |                                        | 0,00007712                                                |

*Решение.* Составляем вспомогательную таблицу (таблица 7). В соответствии с формулами (20), (21) и (26) находим

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{n \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \sigma_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = \frac{6 \times 0,1895 - 0,82 \times 1,2}{6 \times 0,28 - 1,44} = 0,638,$$

$$C_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = \frac{0,82 \times 0,28 - 1,2 \times 0,1895}{6 \times 0,28 - 1,44} = 0,009,$$

$$S_\tau = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_n + C_n - \tau_i^2} = \sqrt{\frac{0,00007712}{4}} = 0,0044.$$

Средние квадратические отклонения находим по формулам (24) и (25):

$$S_c = S_\tau \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}} = 0,0044 \times \sqrt{\frac{0,28}{6 \times 0,28 - 1,44}} = 0,0048,$$

$$S_{\operatorname{tg} \varphi} = S_\tau \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i^2}} = 0,0044 \times \sqrt{\frac{6}{6 \times 0,28 - 1,44}} = 0,022.$$

Вычисляем для  $\text{tg}\varphi$  и  $C$  коэффициент вариации  $V$  по формуле (13):

$$V_{\text{tg}\varphi} = \frac{S_{\text{tg}\varphi}}{\text{tg}\varphi_n} = \frac{0,022}{0,638} = 0,035,$$

$$V_C = \frac{S_C}{C_n} = \frac{0,0048}{0,009} = 0,533,$$

Показатель точности оценки среднего значения характеристики  $\rho_\alpha$  определяют по формуле (23). Из таблицы А.2 Приложения А следует, что при  $n = 6$  и  $\alpha = 0,95$  (расчет оснований по несущей способности)  $t_{\alpha_I} = 2,01$ ; при  $n = 6$  и  $\alpha = 0,85$  (расчет оснований по деформациям)  $t_{\alpha_{II}} = 1,16$ .

$$\hat{\rho}_{\text{tg}\varphi_I} = t_{\alpha_I} V_{\text{tg}\varphi} = 2,01 \times 0,035 = 0,070,$$

$$\hat{\rho}_{\text{tg}\varphi_{II}} = t_{\alpha_{II}} V_{\text{tg}\varphi} = 1,16 \times 0,035 = 0,041,$$

$$\hat{\rho}_{C_I} = t_{\alpha_I} V_C = 2,01 \times 0,533 = 1,071,$$

$$\hat{\rho}_{C_{II}} = t_{\alpha_{II}} V_C = 1,16 \times 0,533 = 0,618.$$

Вычисляем для  $\text{tg}\varphi$  и  $C$  коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$  и их расчетные значения по формулам (13) и (15):

$$\gamma_{g_{\text{tg}\varphi_I}} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{\text{tg}\varphi_I}} = \frac{1}{1 - 0,070} = 1,075,$$

$$\gamma_{g_{\text{tg}\varphi_{II}}} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{\text{tg}\varphi_{II}}} = \frac{1}{1 - 0,041} = 1,043,$$

$$\gamma_{g_{C_I}} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{C_I}} = \frac{1}{1 - 1,071} = -14,085,$$

$$\gamma_{g_{C_{II}}} = \frac{1}{1 - \hat{\rho}_{C_{II}}} = \frac{1}{1 - 0,618} = 2,618,$$

$$\text{tg}\varphi_I = \frac{\text{tg}\varphi_n}{\gamma_{g_{\text{tg}\varphi_I}}} = \frac{0,638}{1,075} = 0,594,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{II} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_n}{\gamma_{g_{\operatorname{tg} \varphi_{II}}}} = \frac{0,638}{1,043} = 0,612,$$

$$C_I = \frac{C_n}{\gamma_{g_{C_I}}} = \frac{0,009}{-14,085} = 0,000,$$

$$C_{II} = \frac{C_n}{\gamma_{g_{C_{II}}}} = \frac{0,009}{2,618} = 0,003.$$

**Вывод:** Нормативное значение удельного сцепления песка мелкого  $C_n = 0,009$  МПа; тангенс угла внутреннего трения  $\operatorname{tg} \varphi_n = 0,638$ . Расчетные значения удельного сцепления  $C$  по несущей способности  $C_I$  принимается равным 0; по деформациям  $C_{II} = 0,003$  МПа. Для угла внутреннего трения – соответственно  $\operatorname{tg} \varphi_I = 0,594$  и  $\operatorname{tg} \varphi_{II} = 0,612$ .

### Задание 3 (4 часа).

Вычислить нормативные и расчетные значения удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  песка мелкого в соответствии с заданным вариантом (таблица 8).

Таблица 8 – Вариационные ряды значений сопротивления срезу  $\tau_i$  при соответствующих значениях нормального напряжения  $\sigma_i$

| Варианты заданий                     |                                     |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Нормальное напряжение $\sigma_i$ МПа | 1                                   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|                                      | Сопротивление срезу, $\tau_i$ , МПа |        |        |        |        |        |        |        |
| 0,1                                  | 0,0675                              | 0,0625 | 0,0925 | 0,0900 | 0,0800 | 0,0825 | 0,0750 | 0,0550 |
|                                      | 0,0637                              | 0,0400 | 0,0750 | 0,0750 | 0,0700 | 0,0775 | 0,0550 | 0,0920 |
| 0,2                                  | 0,1175                              | 0,1400 | 0,1475 | 0,1375 | 0,1562 | 0,1500 | 0,1500 | 0,1300 |
|                                      | 0,1312                              | 0,1500 | 0,1550 | 0,1175 | 0,1300 | 0,1200 | 0,1500 | 0,1475 |
| 0,3                                  | 0,1875                              | 0,1875 | 0,2300 | 0,2175 | 0,2125 | 0,2000 | 0,2250 | 0,2250 |
|                                      | 0,1870                              | 0,2125 | 0,2232 | 0,1875 | 0,2050 | 0,1950 | 0,1985 | 0,2115 |

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введён 07.01.2013 г. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 16 с.
2. Грунтоведение / под ред. Е. М. Сергеева. – М. : МГУ, 1983. – 389 с.
3. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология / В. Д. Ломтадзе. – Л. : Недра, 1984. – 496 с.
4. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород : в 2 т. Том 2. Лабораторные методы / под ред. Е. М. Сергеева. – М. : Недра, 1984. – 437 с.
5. СНБ 5.01.01-99. Основания и фундаменты зданий и сооружений. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1999. – 37 с.
6. СТБ 943-93. Грунты. Классификация. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1995. – 18 с.
7. Ткачук, Э. И. Статистические методы при решении инженерно-геологических задач / Э. И. Ткачук. – Новочеркасск: Новочеркас. политехн. ин-т. – 1975. – 97 с.

# Приложение А

(обязательное)

## Статистические таблицы

Таблица А.1 – Значения критерия  $v$  при двусторонней доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  [1]

| Число<br>определений<br>$n$ | Значение<br>критерия<br>$v$ | Число<br>определений<br>$n$ | Значение<br>критерия<br>$v$ | Число<br>определений<br>$n$ | Значение<br>критерия<br>$v$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 3                           | 1,41                        | 19                          | 2,75                        | 35                          | 3,02                        |
| 4                           | 1,71                        | 20                          | 2,78                        | 36                          | 3,03                        |
| 5                           | 1,92                        | 21                          | 2,80                        | 37                          | 3,04                        |
| 6                           | 2,07                        | 22                          | 2,82                        | 38                          | 3,05                        |
| 7                           | 2,18                        | 23                          | 2,84                        | 39                          | 3,06                        |
| 8                           | 2,27                        | 24                          | 2,86                        | 40                          | 3,07                        |
| 9                           | 2,35                        | 25                          | 2,88                        | 41                          | 3,08                        |
| 10                          | 2,41                        | 26                          | 2,90                        | 42                          | 3,09                        |
| 11                          | 2,47                        | 27                          | 2,91                        | 43                          | 3,10                        |
| 12                          | 2,52                        | 28                          | 2,93                        | 44                          | 3,11                        |
| 13                          | 2,56                        | 29                          | 2,94                        | 45                          | 3,12                        |
| 14                          | 2,60                        | 30                          | 2,96                        | 46                          | 3,13                        |
| 15                          | 2,64                        | 31                          | 2,97                        | 47                          | 3,14                        |
| 16                          | 2,67                        | 32                          | 2,98                        | 48                          | 3,14                        |
| 17                          | 2,70                        | 33                          | 3,00                        | 49                          | 3,15                        |
| 18                          | 2,73                        | 34                          | 3,01                        | 50                          | 3,16                        |

Таблица А.2 – Значение коэффициента  $t_\alpha$  [1]

| Число<br>степеней<br>свободы<br>$K$ | Значение коэффициента $t_\alpha$ при односторонней доверительной вероятности $\alpha$ , равной |                |                |                 |                |                |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                     | 0,85<br>(0,70)                                                                                 | 0,90<br>(0,80) | 0,95<br>(0,90) | 0,975<br>(0,95) | 0,98<br>(0,96) | 0,99<br>(0,98) |
| 3                                   | 1,25                                                                                           | 1,64           | 2,35           | 3,18            | 3,45           | 4,54           |
| 4                                   | 1,19                                                                                           | 1,53           | 2,13           | 2,78            | 3,02           | 3,75           |
| 5                                   | 1,16                                                                                           | 1,48           | 2,01           | 2,57            | 2,74           | 3,36           |
| 6                                   | 1,13                                                                                           | 1,44           | 1,94           | 2,45            | 2,63           | 3,14           |
| 7                                   | 1,12                                                                                           | 1,41           | 1,90           | 2,37            | 2,54           | 3,00           |
| 8                                   | 1,11                                                                                           | 1,40           | 1,86           | 2,31            | 2,49           | 2,90           |
| 9                                   | 1,10                                                                                           | 1,38           | 1,83           | 2,26            | 2,44           | 2,82           |
| 10                                  | 1,10                                                                                           | 1,37           | 1,81           | 2,23            | 2,40           | 2,76           |
| 11                                  | 1,09                                                                                           | 1,36           | 1,80           | 2,20            | 2,36           | 2,72           |
| 12                                  | 1,08                                                                                           | 1,36           | 1,78           | 2,18            | 2,33           | 2,68           |
| 13                                  | 1,08                                                                                           | 1,35           | 1,77           | 2,16            | 2,30           | 2,65           |
| 14                                  | 1,08                                                                                           | 1,34           | 1,76           | 2,15            | 2,28           | 2,62           |
| 15                                  | 1,07                                                                                           | 1,34           | 1,75           | 2,13            | 2,27           | 2,60           |
| 16                                  | 1,07                                                                                           | 1,34           | 1,75           | 2,12            | 2,26           | 2,58           |
| 17                                  | 1,07                                                                                           | 1,33           | 1,74           | 2,11            | 2,25           | 2,57           |
| 18                                  | 1,07                                                                                           | 1,33           | 1,73           | 2,10            | 2,24           | 2,55           |
| 19                                  | 1,07                                                                                           | 1,33           | 1,73           | 2,09            | 2,23           | 2,54           |
| 20                                  | 1,06                                                                                           | 1,32           | 1,72           | 2,09            | 2,22           | 2,53           |
| 25                                  | 1,06                                                                                           | 1,32           | 1,71           | 2,06            | 2,19           | 2,49           |
| 30                                  | 1,05                                                                                           | 1,31           | 1,70           | 2,04            | 2,17           | 2,46           |
| 40                                  | 1,05                                                                                           | 1,30           | 1,68           | 2,02            | 2,14           | 2,42           |
| 60                                  | 1,05                                                                                           | 1,30           | 1,67           | 2,00            | 2,12           | 2,39           |

Примечание – В головке таблицы в скобках приведены значения двусторонней доверительной вероятности  $\alpha$ .

Таблица А.3 – Значения критерия  $F_\alpha$  при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  [1]

| Число степеней свободы $K_2$                                                               | Значения критерия $F_\alpha$ ( $\alpha = 0,95$ ) при числе степеней свободы $K_1$ , равном |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                                            | 5                                                                                          | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 14   | 16   | 20   | 30   | 40   | 60   |
| 5                                                                                          | 5,05                                                                                       | 4,95 | 4,88 | 4,82 | 4,78 | 4,74 | 4,70 | 4,68 | 4,64 | 4,60 | 4,56 | 4,50 | 4,46 | 4,43 |
| 6                                                                                          | 4,39                                                                                       | 4,28 | 4,21 | 4,15 | 4,10 | 4,06 | 4,03 | 4,00 | 3,96 | 3,92 | 3,87 | 3,81 | 3,77 | 3,74 |
| 7                                                                                          | 3,97                                                                                       | 3,87 | 3,79 | 3,73 | 3,68 | 3,63 | 4,60 | 3,57 | 3,52 | 3,49 | 3,44 | 3,38 | 3,34 | 3,30 |
| 8                                                                                          | 3,69                                                                                       | 3,58 | 3,50 | 3,44 | 3,39 | 3,34 | 4,31 | 3,28 | 3,23 | 3,20 | 3,15 | 3,08 | 3,05 | 3,01 |
| 9                                                                                          | 3,48                                                                                       | 3,37 | 3,29 | 3,23 | 3,18 | 3,13 | 3,10 | 3,07 | 3,02 | 2,98 | 2,93 | 2,86 | 2,82 | 2,79 |
| 10                                                                                         | 3,33                                                                                       | 3,22 | 3,14 | 3,07 | 3,02 | 2,97 | 2,94 | 2,91 | 2,86 | 2,82 | 2,77 | 2,70 | 2,67 | 2,62 |
| 11                                                                                         | 3,20                                                                                       | 3,09 | 3,01 | 2,95 | 2,90 | 2,86 | 2,82 | 2,79 | 2,74 | 2,70 | 2,65 | 2,57 | 2,53 | 2,49 |
| 12                                                                                         | 3,11                                                                                       | 3,00 | 2,92 | 2,85 | 2,80 | 2,76 | 2,72 | 2,69 | 2,64 | 2,60 | 2,54 | 2,46 | 2,42 | 2,38 |
| 13                                                                                         | 3,02                                                                                       | 2,92 | 2,84 | 2,77 | 2,72 | 2,67 | 2,63 | 2,60 | 2,55 | 2,51 | 2,46 | 2,38 | 2,34 | 2,30 |
| 14                                                                                         | 2,96                                                                                       | 2,85 | 2,77 | 2,70 | 2,65 | 2,60 | 2,56 | 2,53 | 2,48 | 2,44 | 2,39 | 2,31 | 2,27 | 2,22 |
| 15                                                                                         | 2,90                                                                                       | 2,79 | 2,70 | 2,64 | 2,59 | 2,55 | 2,51 | 2,48 | 2,43 | 2,39 | 2,33 | 2,25 | 2,21 | 2,16 |
| 16                                                                                         | 2,85                                                                                       | 2,74 | 2,66 | 2,59 | 2,54 | 2,49 | 2,45 | 2,42 | 2,37 | 2,33 | 2,28 | 2,20 | 2,16 | 2,11 |
| 17                                                                                         | 2,81                                                                                       | 2,70 | 2,62 | 2,55 | 2,50 | 2,45 | 2,41 | 2,38 | 2,33 | 2,29 | 2,23 | 2,15 | 2,11 | 2,06 |
| 18                                                                                         | 2,77                                                                                       | 2,66 | 2,58 | 2,51 | 2,46 | 2,41 | 2,37 | 2,34 | 2,29 | 2,25 | 2,19 | 2,11 | 2,07 | 2,02 |
| 19                                                                                         | 2,74                                                                                       | 2,63 | 2,55 | 2,48 | 2,43 | 2,38 | 2,34 | 2,31 | 2,26 | 2,21 | 2,15 | 2,07 | 2,02 | 1,98 |
| 20                                                                                         | 2,71                                                                                       | 2,60 | 2,52 | 2,45 | 2,40 | 2,35 | 2,31 | 2,28 | 2,23 | 2,18 | 2,12 | 2,04 | 1,99 | 1,95 |
| 22                                                                                         | 2,66                                                                                       | 2,55 | 2,47 | 2,40 | 2,35 | 2,30 | 2,26 | 2,23 | 2,18 | 2,13 | 2,07 | 1,98 | 1,93 | 1,89 |
| 24                                                                                         | 2,62                                                                                       | 2,51 | 2,43 | 2,36 | 2,30 | 2,26 | 2,22 | 2,18 | 2,13 | 2,09 | 2,02 | 1,94 | 1,89 | 1,84 |
| 26                                                                                         | 2,59                                                                                       | 2,47 | 2,39 | 2,32 | 2,27 | 2,22 | 2,18 | 2,15 | 2,10 | 2,05 | 1,99 | 1,90 | 1,85 | 1,80 |
| 28                                                                                         | 2,56                                                                                       | 2,44 | 2,36 | 2,29 | 2,24 | 2,19 | 2,15 | 2,12 | 2,06 | 2,02 | 1,96 | 1,87 | 1,81 | 1,77 |
| 30                                                                                         | 2,53                                                                                       | 2,42 | 2,34 | 2,27 | 2,21 | 2,16 | 2,12 | 2,09 | 2,04 | 1,99 | 1,93 | 1,84 | 1,79 | 1,74 |
| 40                                                                                         | 2,45                                                                                       | 2,34 | 2,25 | 2,18 | 2,12 | 2,08 | 2,04 | 2,00 | 1,95 | 1,90 | 1,84 | 1,74 | 1,69 | 1,64 |
| 50                                                                                         | 2,40                                                                                       | 2,29 | 2,20 | 2,13 | 2,07 | 2,02 | 1,98 | 1,95 | 1,90 | 1,85 | 1,78 | 1,69 | 1,63 | 1,58 |
| 60                                                                                         | 2,37                                                                                       | 2,25 | 2,17 | 2,10 | 2,04 | 1,99 | 1,95 | 1,92 | 1,87 | 1,82 | 1,75 | 1,65 | 1,59 | 1,53 |
| Примечание – $K_1$ и $K_2$ – число степеней свободы числителя и знаменателя соответственно |                                                                                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Производственно-практическое издание

**Трацевская** Елена Юрьевна

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ  
МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 29.05.2019. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,1.  
Уч.-изд. л. 2,3. Тираж 25 экз. Заказ 446.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 14/52 от 17.04.2017.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины