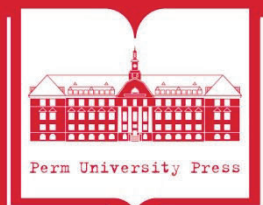


ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ЗАПАДНОГО УРАЛА

Сборник научных статей

Выпуск 6(43)



Пермь 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ЗАПАДНОГО УРАЛА

Сборник научных статей

Выпуск 6(43)

Под общей редакцией П. А. Красильникова



Пермь 2023

УДК 550.8+622

ББК 26.3

Г36

Геология и полезные ископаемые Западного Урала [Электронный ресурс] : сборник научных статей / под общ. ред. П. А. Красильникова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023. – Вып. 6(43). – 27,5 Мб ; 322 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/geologiya-i-poleznye-iskopaemye-zapadnogo-urala-43.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3085-1

ISBN 978-5-7944-3999-1 (вып. 6(43))

Сборник содержит научные статьи по материалам 43 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения», состоявшейся 23–24 мая 2023 г. в Пермском государственном национальном исследовательском университете.

Статьи посвящены геологии западного склона Урала, Камского Приуралья и других регионов России. Рассмотрены общие вопросы геологии, проблемы минералогии, литологии, месторождений твердых полезных ископаемых нефти и газа, а также вопросов геофизических методов исследования недр, гидрогеологии, карстоведения, инженерной геологии, экологической геологии.

Для геологов широкого профиля, нефтяников, геофизиков и других специалистов по исследованию недр Земли, добыче полезных ископаемых, экономистов, а также для студентов геологических направлений и специальностей вузов.

УДК 550.8+622

ББК 26.3

*Печатается по решению ученого совета геологического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д. г.-м. н. П. А. Красильников (главный редактор),
д. г.-м. н. И. С. Копылов (отв. редактор), Е. А. Меньшикова,
Е. Е. Кожевникова, В. И. Костицын, О. Б. Наумова, В. В. Середин

РЕЦЕНЗЕНТЫ

д. т. н., начальник отдела геофизических исследований ООО НИПППД «Недра»

А. В. Татаркин

д. т. н., директор по промысловой геофизике ПАО «Пермнефтегеофизика»

А. В. Шумилов

ISBN 978-5-7944-3085-1

ISBN 978-5-7944-3999-1 (вып. 6(43))

© ПГНИУ, 2023

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В статье поднимается вопрос применения зависимости прочностных свойств от природной влажности глинистых грунтов для прогнозирования значений удельного сцепления и угла внутреннего трения на участках, где механические характеристики не определялись. К настоящему времени многими исследователями отмечается уменьшение прочности глинистых грунтов при повышении содержания в них водной компоненты, также установлена ограниченность использования для каждого отдельного региона нормативных табличных данных, разработанных для территории всей страны в целом. Авторами с помощью корреляционного и регрессионного анализов данных лабораторного определения физических и физико-механических характеристик грунтов установлена зависимость между прочностными свойствами и показателями, численно выражающими влажность грунтов. Составлены регрессионные уравнения для прогнозирования. Выполнен анализ отклонения расчетных, табличных значений от лабораторных. В качестве исходных данных использованы результаты инженерно-геологических изысканий, проведенных на территории села Шушмабаш (Республика Татарстан). В заключении сделаны выводы: о наличии тесной зависимости между рассматриваемыми физическими и физико-механическими свойствами, незначительном отклонении рассчитанных прогнозных значений, неприменимости имеющихся нормативных табличных свойств грунтов для исследуемой территории.

Ключевые слова: природная влажность, число пластичности, показатель текучести, плотность, коэффициент пористости, удельное сцепление, угол внутреннего трения, регрессионный анализ, корреляционный анализ, прогнозирование.

М.А. Kitaeva, E.V. Drobinina
Perm State University, kitaeva0822@yandex.ru

PREDICTION OF STRENGTH PROPERTIES OF CLAYEY SOILS ACCORDING TO LABORATORY DETERMINATION OF THEIR PHYSICAL CHARACTERISTICS

The article raises the question of using the dependence of strength properties on the natural moisture content of clay soils to predict the values of specific adhesion and the angle of internal friction in areas where mechanical characteristics have not been determined. To date, many researchers have noted a decrease in the strength of clay soils with an increase in their content of water component, also established the limited use for each individual region of the normative table data developed for the territory of the whole country. By means of correlation and regression analysis of the laboratory data of physical and physical-mechanical characteristics of soils the dependence between the strength properties and the indices numerically expressing the moisture content of soils has been established by the authors. Regression equations for forecasting were made up. Deviation of calculated, tabulated values from laboratory ones was analyzed. The results of engineering-geological surveys conducted in the territory of the Shush-

mabash village (Republic of Tatarstan) were used as the initial data. In the conclusion the following conclusions were made: the presence of close dependence between the considered physical and physical-mechanical properties, insignificant deviation of the calculated predicted values, inapplicability of the available normative tabulated properties of soils for the investigated territory.

Key words: natural humidity, plasticity number, yield index, density, porosity coefficient, specific adhesion, internal friction angle, regression analysis, correlation analysis, forecasting.

Грунт – это система, изменяющаяся во времени и состоящая из нескольких компонентов, одним из которых являются водные растворы.

В составе инженерно-геологических изысканий, выполняемых для проектирования и строительства зданий и сооружений, согласно действующей нормативной документации (СП 22.13330.2016), обязательным является проведение лабораторных испытаний для определения прочности грунтов: удельного сцепления и угла внутреннего трения. Однако количество определений этих параметров ограничено шестью на ИГЭ – инженерно-геологический элемент, представляющий результат схематизации инженерно-геологического разреза территории по совокупному набору характеристик грунтов. Короткие сроки проведения инженерных изысканий и, иногда, их ограниченное финансирование зачастую ведут к выполнению изысканий в объемах, не превышающих требования нормативной документации, что в случае такой динамичной системой как грунт, может привести к негативным последствиям при эксплуатации сооружений вследствие недоучета особенностей прочностных свойств грунтов основания.

Также стоит отметить, что в вышеупомянутом своде правил представлены таблицы нормативных значений механических свойств, устанавливаемые по физическим параметрам, которые в ряде случаев принимаются как рекомендуемые в результате изысканий. Однако, согласно руководству по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов [11], для каждого региона должны быть установлены свои значения параметров пород.

Авторами предлагается устанавливать зависимость между прочностными свойствами грунтов конкретной территории и показателями их физических свойств с последующей интерполяцией на участках, где в результате изысканий оценены только физические свойства грунтов.

А.Я. Рубинштейн, Ф.С. Канаев, опираясь на исследования ленточных озерно-ледниковых глин, проведенные Л.К. Морозовой и Н.Г. Лукинской, сделали вывод о наличии обратно пропорциональной зависимости показателей физико-механических свойств (сцепления, угла внутреннего трения) от физических характеристик грунтов (влажности, показателя консистенции, коэффициента пористости, влажности на границе раскатывания) [10]. П.Н. Панюков также отмечал зависимость сопротивления сдвигу у глинистых грунтов от влажности: чем меньше содержание водной компоненты в грунте, тем выше значения угла внутреннего трения и, соответственно, одноименного коэффициента. В.Т. Трофимов установил, что грунты, обладающие твердой консистенцией, отличаются большей прочностью, чем породы с текучей консистенцией [9,16].

М.П. Лысенко, В.Т. Трофимов зафиксировали, что влажность, в свою очередь, зависит от пористости: при повышении отношения объема пор к объему грунта

возрастает количественное содержание жидкой компоненты, которую грунт потенциально может вместить [6, 16]. Также стоит отметить, что глинистые грунты, в отличие от песчаных, характеризуются пластичностью, которая отражает наличие рыхлосвязанной воды. Для количественного выражения используют параметр – число пластичности, определяемый как разность влажностей на границах текучести и раскатывания [13].

Таким образом, в качестве физических показателей, которые прямо или косвенно отражают количественное содержание водных растворов в глинистых грунтах, в рамках данной работы предлагается использовать: плотность грунта, коэффициент пористости, показатель текучести и число пластичности.

Методы исследования и инструментарий, использованные в работе

Авторами работы зависимость между прочностными свойствами и исследуемыми физическими показателями влажности в прогностических целях оценивается с помощью методов статистической обработки: корреляционного и регрессионного анализов данных лабораторного исследования проб грунтов. Результаты работы для наглядности приводятся в графическом и картографическом исполнении.

В работе использованы данные инженерно-геологических изысканий под площадной объект сельскохозяйственного назначения. Общее количество проб, для которых определены физические и физико-механические свойства водовмещающих глинистых грунтов – 74, определений природной влажности – 64, показателя текучести – 64, числа пластичности – 64, коэффициента пористости – 64, плотности – 64, угла внутреннего трения – 20 и удельного сцепления – 20 (по сдвиговым испытаниям).

Краткая характеристика территории

Исследуемая территория находится вблизи с. Шушмабаш Арского района Республики Татарстан.

Согласно геоморфологическому районированию, исследуемая территория относится к типу умеренно-расчлененной денудационной равнины Нижнего плато. Западная часть участка расположена в пределах слабовсхолмленной денудационной равнины [2].

Территория Арского района отличается умеренно-континентальным климатом с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Среднегодовое количество атмосферных осадков изменяется в пределах от 525 до 550 мм в год, максимальное значение которых наблюдается в июле, в основном (около 70%) осадки выпадают в жидкой форме, запасы воды в снежном покрове в целом на территории Республики не превышает 150 мм, высота снежного покрова колеблется от 35 до 75 см с максимумами в начале марта. Мощность снега определяет степень промерзания почв и грунтов, что в свою очередь влияет на уровень грунтовых вод [2,12].

Арский район приурочен к западной части крупной региональной структуры II порядка – Волго-Уральской антеклизы, и расположен в пределах Восточно-Европейской платформы. Территория обследования находится в северной части Северо-Татарского свода, в области распространения Цыпьянской валлообразной зоны. В инженерно-геологическом строении исследуемой территории до глубины 12 м участвуют четвертичные элювиально-делювиальные (edQ) и элювиальные (eP₂) глинистые грунты: супеси, суглинки и глины.

Рассматриваемая территория по региональным данным приурочена к Восточно-Европейской артезианской области, Волго-Камскому артезианскому бассейну, верхнепермско-триасовому и четвертичному водоносным комплексам [5]. На исследуемом участке выделены два горизонта по типу и классу скопления вод, согласно классификации И.К. Зайцева, Н.И. Толстихина, В.А. Кирюхина. Воды первого от поверхности горизонта относятся к пластовому типу, поровому классу, приурочены к отложениям четвертичной системы, водовмещающими грунтами являются мягкопластичные глины и текучепластичные суглинки. Глубина залегания изменяется от 0,8 до 5,1 м. Горизонт развит преимущественно на западе, севере и юге исследуемой территории, отсутствует в центральной и северо-восточной части.

Второй водоносный горизонт характеризуется наличием пластовых (по типу скопления) трещинных (по классу скопления) вод, распространённых в супесчаных отложениях элювия пермских пород, залегающих на глубинах от 4,7 до 10,6 м, распространённых по всей территории, за исключением восточной части.

Согласно нормативной документации (СП 116.13330.2012), на территории Татарстана зафиксированы проявления следующих экзогенных инженерно-геологических процессов: оползней, карстовых процессов, подтопления, переработки берегов, морозного пучения. Исследуемый участок относится к естественно подтопленной территории: около 85% территории исследования характеризуется положением уровня подземных вод первого от поверхности горизонта на глубине до 3,0 м, с учетом подъёма уровня на 0,5-1,0 м (по данным изысканий) в периоды таяния снега и сильных дождей (согласно пп. 5.4.8 и 5.4.9 СП 22.13330.2016).

Таким образом, наибольшие значения естественной влажности грунтов наблюдаются весной в период активного таяния снега, летом во время выпадения атмосферных осадков в виде дождей, наиболее низкие – осенью и зимой, когда из-за наличия снежного покрова инфильтрация затруднена. Слабохолмистый, умеренно-расчлененный равнинный рельеф способствует инфильтрации атмосферных осадков практически в полном объеме. Наличие в геологическом строении полутвердых и твердых глин и суглинков, развитие подземных вод в близповерхностных условиях способствуют формированию водоносных горизонтов межпластового безнапорного типа и насыщению глинистых грунтов (супесей, глин, суглинков) водными растворами. На территории в значительной степени развиты процессы подтопления, что, в свою очередь, также является благоприятным условием для увеличения содержания воды в глинистых грунтах.

Методика выполнения работы

Принципиально методика выполнения анализа состоит из следующих действий: статистической обработки данных с установлением корреляционных зависимостей и построения регрессионных уравнений, на основе которых прогнозируются сцепление и угол внутреннего трения грунтов, с последующим анализом и выбором более оптимального показателя физических параметров для прогнозирования механических свойств [2, 11].

В работе применены два статистических метода: корреляционный и регрессионный анализы. По результатам первого, как правило, делаются выводы о наличии взаимозависимостей и их тесноте, определяются дальнейшие направления исследований – проведение дополнительно регрессионного анализа, в ходе которого можно формализовать характер зависимости, выявить выбивающиеся значения из тренда, графически отражающего зависимость, и выяснить причины отклонения [1,7].

Для установления корреляционной зависимости применен коэффициент корреляции Пирсона, а теснота связи (насколько зависим один параметр от другого) определена по шкале Чеддока (табл.1).

Таблица 1. Шкала Чеддока [17]

Коэффициент корреляции	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	0,9 – 0,99
Связь	слабая	умеренная	заметная	высокая	весьма высокая

Примечание: при положительных значениях связь прямая, при отрицательных обратная

Корреляционный и регрессионный анализ. В работе исследованы водовмещающие глины и суглинки, супеси, формирующие, соответственно, первый и второй водоносные горизонты.

Предварительно по результатам лабораторного исследования составлены базы данных для каждого исследуемого прочностного свойства и по каждому коррелируемому показателю физических свойств (коэффициенту пористости, плотности грунта, числу пластичности и показателю текучести), также в таблицах отражены номера ИГЭ (ИГЭ№ 2 – глина мягкопластичная элювиально-делювиального генезиса четвертичного возраста, ИГЭ№ 3 – суглинок текучепластичный элювиально-делювиального генезиса четвертичного возраста, ИГЭ№ 6 – супесь пластичная элювиального генезиса пермского возраста), номера скважин, глубина установившегося уровня подземных вод.

По полученным таблицам и при помощи функций табличного редактора MS Excel проведен корреляционный анализы, конечным результатом которого является получение коэффициента корреляции (R). Коэффициенты корреляции для каждой пары параметров представлены в табл. 2

Таблица 2. Коэффициент корреляции по каждой паре параметров физических и механических свойств глинистых грунтов

	С от IL	φ от IL	С от I _p	φ от I _p	С от P	φ от P	С от e	φ от e
R1	0,60	-0,59	0,74	-0,75	0,64	0,54	-0,58	-0,61
R2	-0,51	-0,64						

Примечание: R1 – коэффициент корреляции по первой выборке, R2 – коэффициент корреляции по второй выборке, С – сцепление, Φ – угол внутреннего трения, IL – показатель текучести, I_p – число пластичности, e – коэффициент пористости, P – плотность.

На основании результатов корреляционного анализа сделаны выводы, что между сцеплением и показателем текучести (по первой выборке), числом пластичности, плотностью грунта, а также между углом внутреннего трения и плотностью грунта существует прямая зависимость, а между сцеплением и показателем текучести (по второй выборке), коэффициентом пористости, а также между углом внутреннего трения и показателем текучести, числом пластичности, коэффициентом пористости – обратная, что соответствуют знаку коэффициента корреляции (табл. 2.). Согласно шкале Чедокка большая часть корреляционно-связанных пар имеют заметную связь, параметры прочностных свойств с числом пластичности отличаются высокой теснотой связи.

Таким образом, при повышении плотности грунта значения обоих показателей рассматриваемых механических свойств возрастают, что связано с уменьшением порового пространства, способного вмещать водные растворы. Для коэффициента пористости характерна противоположная картина – по мере его роста снижаются значения прочностных свойств.

Показатель текучести численно выражает содержание воды в грунте, следовательно, чем выше значение параметра, тем ниже прочностные свойства, что подтверждено полученным коэффициентом корреляции для угла внутреннего трения. Прямо пропорциональная зависимость прочностных свойств от показателя текучести может быть обусловлена возникновением в мягкопластичных глинах капиллярных связей, повышающих прочность породы за счет стягивания частиц при формировании менисков, но по мере роста содержания водных растворов, трение между частицами ослабляется и прочность значительно снижается [8]. Увеличение значений удельного сцепления с повышением числа пластичности связано с превалированием сцепления между частицами над трением за счет возрастания фракции глинистых частиц [13, 16].

После проведения корреляционного анализа для установления характера взаимосвязи выполнен регрессионный анализ, по результатам которого получены линейные уравнения, графически отражающие зависимость между параметрами (рис. 1, рис. 2). Построение регрессионных моделей осуществлено *методом наименьшего квадрата*.

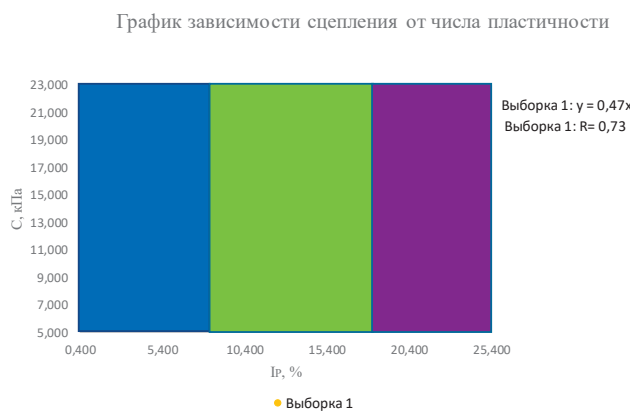


Рис. 1. График зависимости сцепления от числа пластичности (область голубого цвета – ИГЭ № 6, область зеленого цвета – ИГЭ № 3, область фиолетового цвета – ИГЭ 2)

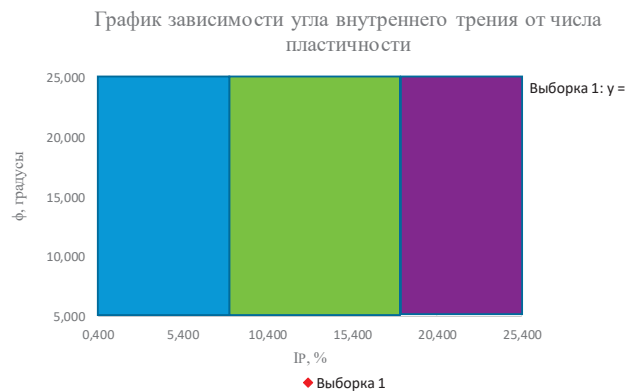


Рис. 2. График зависимости угла внутреннего трения от числа пластичности (область голубого цвета – ИГЭ № 6, область зеленого цвета – ИГЭ № 3, область фиолетового цвета – ИГЭ 2)

На основе полученных регрессионных моделей подтверждены выводы корреляционного анализа о наличии и характере зависимостей (прямой или обратной). С использованием уравнений регрессии определены прогнозные значения сцепления и угла внутреннего трения для водовмещающих глинистых грунтов в интервале глубин 2,5-4,0 м. После подготовлены таблицы с расчетными и лабораторными данными сцепления и угла внутреннего трения, которые в дальнейшем использованы для построения прогнозных карт прочностных свойств исследуемых грунтов (рис. 3, рис. 4). Полученные значения сцепления и угла внутреннего трения по табличным данным, результатам лабораторных исследований и расчетам систематизированы с целью определения отклонения значений исследуемых свойств, определенных косвенными методами, от значений, полученных по результатам сдвиговых испытаний.

подавляющее большинство прогнозных значений прочностных свойств имеет отклонение в 0-15% от лабораторных данных, исключением являются данные по сцеплению, определенному по регрессионной модели зависимости от показателя текучести – отклонение составило 15-30% (рис. 5). Наиболее точно прогнозируется угол внутреннего трения в зависимости от числа пластичности. Для сцепления число пластичности также выступает не менее подходящим параметром. Стоит отметить, что характер отклонения по данным плотности грунта и коэффициента пористости отличается несколько меньшим эксцессом кривой распределения, при этом сохраняя максимальное количество отклонений в пределах 0-15 %.

Таким образом, все исследуемые физические параметры могут быть использованы для прогнозирования прочностных свойств глинистых грунтов, однако наиболее оптимальным в данном случае выступает число пластичности.

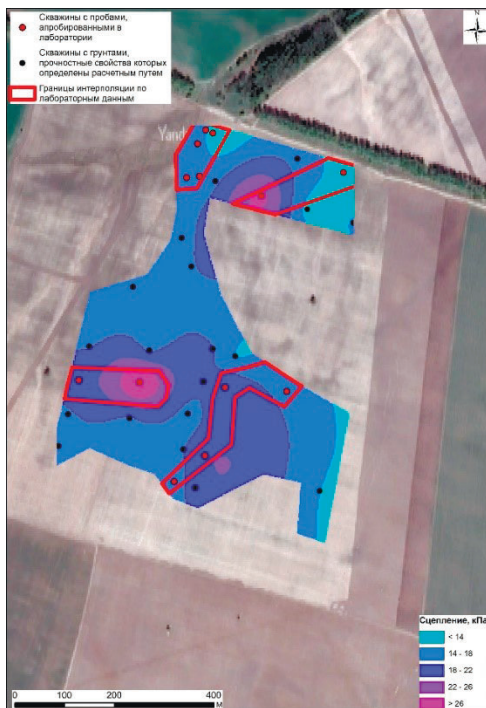


Рис. 3. Карты изменения сцепления по латерали в зависимости от числа пластичности



Рис. 4. Карты изменения угла внутреннего трения по латерали в зависимости от числа пластичности



Рис. 5. Отклонения расчетных, определяемых по числу пластичности, от лабораторных данных, %

Также в работе определено отклонение табличных нормативных значений от лабораторных данных. Наибольшее число табличных данных по углу внутреннего трения не совпадает с лабораторными на 15-30%, а по сцеплению на более 100%, следовательно, значения, указанные в СП 22.13330.2016, для изучаемой территории можно использовать только в качестве справочных (рис. 6).

По результатам выполненной работы можно сделать вывод, что удельное сцепление и угол внутреннего трения находятся с рассматриваемыми физическими параметрами грунтов в тесной зависимости. Полученные регрессионные

уравнения позволяют достоверно прогнозировать прочностные свойства: с незначительным процентом отклонения, 0-15%. Также установлено ограниченное применение табличных данных для определения механических параметров грунтов на изучаемой территории.

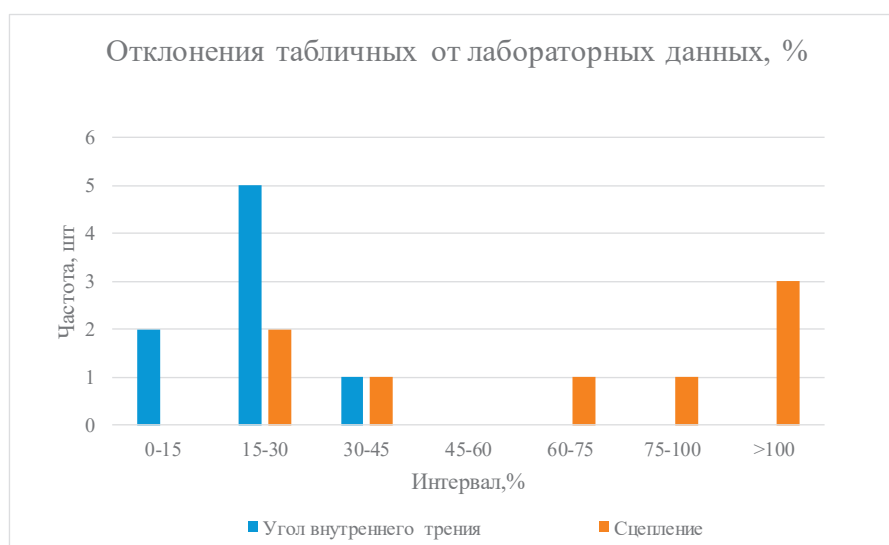


Рис. 6. Отклонения табличных от лабораторных данных, %

Библиографический список

1. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. М.: государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 498 с.
2. Буров Б.В. Геология Татарстана. М.:ГЕОС, 2003. 402 с.
3. Бусел И. А. Прогнозирование строительных свойств грунтов. Мн.: Наука и техника, 1989. 246 с.
4. ГОСТ 20522–2012. Грунты. методы статистической обработки результатов испытания. 2012.
5. Кирюхин В.Л., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология. М.: Недра 1987. 382 с.
6. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М.: Недра, 1980. 272 с.
7. Никифоров И.А. Статистический анализ геологических данных. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. 170 с.
8. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
9. Панюков П.Н. Инженерная геология. М.: Недра, 1978. 296 с.
10. Рубинштейн А.Я., Канаев Ф.С. Инженерно-геологические изыскания для строительства на слабых грунтах. М.: Стройиздат, 1984. 108с.
11. Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов / ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1981. 55 с.
12. Сергеева Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. геологические основы. М.: Недра, 1985. 332 с.
13. Середин В.В. Курс лекций по грунтоведению. Часть 1. Состав, строение и свойства грунтов. Пермь: ПГУ, 2010. 128 с.
14. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. 2012.
15. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. 2016.
16. Трофимов В.Т. Грунтоведение. М.: МГУ, 2005, 1024.
17. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston, New York, 1925. 471 p.