

Определив таким образом показатели прочности  $A$  и  $B$ , по формуле (2) можно найти несущую способность залежи при различных размерах отпечатка опорной поверхности движителя машины, а сравнив ее с удельным давлением, передаваемым машиной на грунт, оценить возможность нормальной работы машины на данной залежи. При этом необходимо учитывать не только статическое удельное давление, но и коэффициент динамичности работающей машины.

Следует отметить, что предельную нагрузку, вызывающую потерю торфом несущей способности, точно определить невозможно – на кривой  $S = f(P)$  нет резких изломов; ее определяют, как и для минеральных грунтов, экстраполяцией опытной кривой.

1. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 38 с.

2. Цытович Н. А. Механика грунтов: Краткий курс: учебник. – Изд. 5-е. – М.: книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 272 с.

3. Сергеев Е. М. Грунтоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 595 с.

4. Корчунов С. С. Исследование физико-механических свойств торфа: Труды ВНИИТП. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – Вып. XII. – 232 с.

5. Силкин А. М. Сооружения мелиоративных систем в торфяных грунтах. – М.: Агропромиздат, 1986. – 137 с.

Материал поступил в редакцию 01.10.13.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью»  
Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru

**Силкин Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты»  
Тел. 8-916-510-43-64

**Савельев Александр Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания и фундаменты»  
Тел. 8-499-976-09-37

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е. В. АНДРЕЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

**Н. Ф. ЖАРНИЦКАЯ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет»

## МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО УСТАНОВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ, УЛОЖЕННЫХ В ТЕЛО НИЗКОНАПОРНЫХ ПЛОТИН

*Рассматриваются методы установления закономерностей оперативного определения строительных показателей грунтов на основе корреляционно-регрессивного анализа экспериментальных данных, позволяющие учитывать межфакторные связи в грунтах.*

*Корреляционно-регрессивный анализ, зерновой состав грунта, плотность грунта, плотность частиц грунта, показатели пластичности грунта, квалификационный показатель (модуль), коэффициент детерминации, показатели стандартного уплотнения грунта, показатели прочности грунта, показатель водопроницаемости грунта.*

*There are considered methods of regularities establishment of efficient determination of soil building indicators on the basis of the correlative-regressive analysis of the experimental data which allow take into consideration inter-factor connections in soils.*

*Correlative-regressive analysis, grain composition of soil, density of soil, density of soil granules, indicators of soil plasticity, qualification indicator (module), coefficient of determination, indices of soil standard consolidation, indices of soil strength, indicator of soil water permeability.*

Из всего многообразия грунтовых материалов, используемых для возведения низконапорных грунтовых плотин, связные грунты являются наиболее распространенными, хотя в производстве работ глинистый грунт – наиболее сложный из-за низкой водопроницаемости, влияния погодных условий, небольшого диапазона влажности, при которой грунт допускается к укладке, и пространственной изменчивости свойств в пределах карьера.

Вместе с тем, большой опыт, накопленный при устройстве напорных грунтовых сооружений из связных грунтов, позволяет сделать обобщения и рекомендации не только по назначению основных строительных и геотехнических параметров на стадиях проектирования и строительства, но и обосновать методы оперативного их определения при обследовании грунтовых плотин на этапе эксплуатации. Для этого достаточно иметь основные исходные данные о составе и физических показателях глинистого грунта в теле плотины на основе проведения ограниченного объема полевых и лабораторных работ. Сюда относятся данные о зерновом составе грунта ( $m_{<5}$  – содержание частиц размером менее 5 мм), плотности частиц  $\rho_s$  и плотности  $\rho$  грунта, показателях пластичности  $W_L$  (и/или  $W_p$ ) и влажности  $W$  глинистого материала в теле плотины.

Серьезным недостатком существующих ускоренных методов установления геотехнических параметров грунтов является отсутствие возможности по тем же образцам или пробам, отбираемым из тела сооружения, определять другие строительные показатели (прочности, водопроницаемости и другие), используемые для оценки технического состояния грунтовой плотины.

Задача разработки тех или иных связей для описания важнейшего свойства грунтов – их изменчивости – может осуществляться по двум направлениям [1–3]:

теоретическое обоснование типа распределения с позиции физической сущности модели грунта, в описании которой используется рассматриваемый показатель;

перебор статистических моделей и оценка каждой из них с точки зрения со-

ответствия опытным данным по рассматриваемому показателю.

Безусловно, предпочтителен первый подход, но из-за отсутствия удовлетворительного теоретического обоснования распределения показателей свойств грунтов его реализация затруднена. Поэтому разработка оперативных (ускоренных) методов определения показателей свойств грунтов может выполняться в рамках второго подхода, когда статистический аспект надежности является определяющим. При этом исследование и установление корреляционных связей для оперативного определения строительных показателей грунтов сводится к выполнению следующих этапов [1–3]:

изучению однородности представленных данных к решению вопроса о применении предлагаемого метода;

установлению наиболее точной модели зависимости строительных параметров грунтов от принятых вариантов их квалификационных показателей, зависящих от значений выборок;

установлению тесноты связи между значениями, полученными предлагаемым методом оперативного определения геотехнического показателя грунта, и результатами стандартного (лабораторного) инструментального метода.

Выбор наиболее адекватной (лучшей) модели квалификационного показателя (модуля), через который устанавливается требуемый строительный показатель грунта в теле сооружения, производится сравнением значений коэффициента детерминации  $R^2$ . Чем ближе к 1 коэффициент детерминации, тем точнее проведено моделирование квалификационного показателя, и, следовательно, данная зависимость может быть рекомендована для практического использования.

**Метод оперативного определения показателей стандартного уплотнения глинистого грунта.** Уплотнение грунта – это комплекс таких механических операций, которые приводят к увеличению его плотности на месте укладки. Уплотнение обеспечивает более плотную упаковку частиц грунта, уменьшает его деформируемость и водопроницаемость, но увеличивает прочность.

При уплотнении глинистого грунта, поры которого частично заполнены водой,

сначала происходит уменьшение пор, а затем, когда объем пор становится равным объему заключенной в них воды, грунт перестает сжиматься. Дальнейшее уплотнение такого грунта возможно при условии отжатия воды из его пор. Таким образом, при уплотнении грунта происходит изменение соотношения между объемами частиц и поровой воды в единице объема грунта. На практике показатели стандартного уплотнения  $\rho_{dmax}$  (максимальная плотность сухого грунта) и  $W_{opt}$  (оптимальная влажность уплотнения грунта) определяются на основании лабораторных испытаний грунтов в приборах с точным соблюдением требований нормативных документов.

Оптимально уплотненный глинистый грунт представляет собой плотную массу, в которой поры заполнены физически связанной водой. Главными факторами, влияющими на величину параметров  $\rho_{dmax}$  и  $W_{opt}$ , являются минеральный состав, дисперсность минеральных частиц и энергия уплотнения.

Анализируемые в данной работе оптимальные значения влажности и максимальной плотности сухого грунта  $\rho_{dmax}$  и  $W_{opt}$  получены на основании лабораторных испытаний глинистых грунтов четвертичного возраста с верхним пределом пластичности  $W_L$  от 32 до 60 % в приборе с объемом цилиндра 1000 см<sup>3</sup>, согласно ГОСТ 22733-77 ( $A = 9$  кг см/см<sup>3</sup>), в период инструментального обследования низконапорных грунтовых плотин в Ярославской области, а также образцов карьерного грунта, отобранных в Московской и Ярославской областях. Каждое определение показателей стандартного уплотнения грунта – эксперимент трудоемкий, требующий не менее двух-трех дней. Это связано с отбором грунта, его подготовкой к испытаниям, проведением эксперимента и установлением показателей  $\rho_{dmax}$  и  $W_{opt}$ . Экспериментальные данные физико-механических свойств грунтов, полученные авторами статьи в рамках обследования плотин, показали следующее: чем больше верхний предел пластичности, тем больше величина оптимальной влажности и меньше максимальная плотность скелета. Объясняется это так: чем больше влажность на границе текучести грунта, тем больше его дисперсность и больше влаги в виде связанной воды, соответственно и более значительная часть энергии уплотнения затрачивается на деформирование адсорбированных слоев

при переупаковке частиц грунта.

Среди множества рассмотренных конструкций квалификационных модулей только нижеследующие продемонстрировали наибольшую функциональную связь. Исследование корреляции  $\rho_{dmax} = f[\rho_s I_L]$  для глинистых грунтов четвертичного возраста показало наличие тесной связи между указанными показателями (коэффициент детерминации – 0,894), аппроксимирующейся уравнением (рис. 1)  $\rho_{dmax} = 2,19 - 0,93 \ln[\rho_s I_L], \text{ г/см}^3$  (1) где  $\rho_s$  – плотность частиц глинистого грунта;  $I_L = (W_{opt} - W_p) / I_p$  – показатель текучести глинистого грунта ( $I_p = W_L - W_p$  – число пластичности глинистого грунта, которое с достаточной для практических целей точностью можно определять по зависимостям В. Я. Жарницкого [2, 3]);  $W_L$  и  $W_p$  – соответственно влажность на границе текучести и раскатывания глинистого грунта.

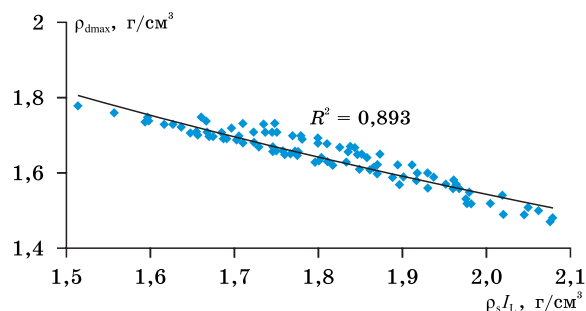


Рис. 1. Зависимость  $\rho_{dmax} = f[\rho_s I_L]$

Исследование корреляции  $W_{opt} = f[e_L]$  для глинистых грунтов четвертичного возраста также показало наличие тесной связи между указанными показателями (коэффициент детерминации – 0,821), аппроксимирующейся уравнением (рис. 2)

$$W_{opt} = 18,96 - 20,53 \ln(e_L), \% \quad (2)$$

где  $e_L = (\rho_w = \rho_s W_L) / \rho_s W_L$  – коэффициент пористости грунта, соответствующий влажности на границе текучести;  $\rho_w$  – плотность воды;  $W_L$  – влажность на границе текучести.

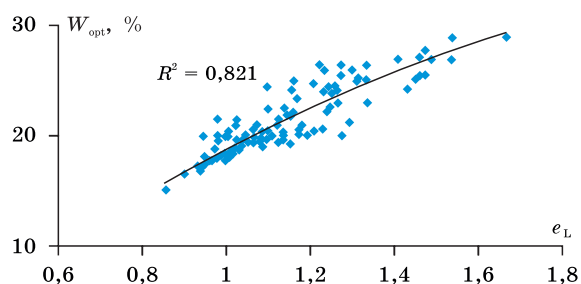


Рис. 2. Зависимость  $W_{opt} = f[e_L]$

Корректность полученных решений подтверждается данными сравнения расчетных значений показателей стандартного уплотнения грунта с экспериментальными – относительная погрешность по результатам сравнения не превысила 6 % [4].

**Метод оперативного определения показателей прочности глинистого грунта.** Сопротивление глинистых грунтов сдвигу зависит от минерального и гранулометрического состава, сложения (нарушенного или ненарушенного), плотности, влажности и условий проведения экспериментов. Наиболее распространенные способы определения сопротивления грунта сдвигу в лабораторных условиях: по фиксируемой поверхности и в условиях трехосного сжатия.

Сопротивление сдвигу грунтов при обследовании и оценке технического состояния плотины – один из важнейших показателей, определяющий устойчивость напорного сооружения, для которого грунты являются строительным материалом. Поэтому результаты проведенных экспериментов по определению сопротивления глинистого грунта, уложенного в тело плотины, интерпретируются с помощью прямых Кулона:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где  $\tau$  – сдвигающее (касательное) напряжение, равное удельному значению общего сопротивления сдвигу;  $\sigma$  – сжимающее нормальное напряжение;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент трения, выраженный через тангенс угла внутреннего трения  $\varphi$ ;  $c$  – удельное сцепление грунта.

В практике геотехнического опробования при обследовании напорных сооружений показатели прочности  $\varphi$  и  $c$  глинистых грунтов устанавливаются методом консолидировано-дренированного среза предварительно уплотненных (не менее чем при трех вертикальных давлениях) водонасыщенных образцов в одноплоскостных срезных приборах. Результаты экспериментов получены с помощью прибора ПСГ-2М, согласно ГОСТ 12248–96, на образцах из монолитов, отобранных из обследованных низконапорных плотин, либо после уплотнения грунтовой массы в приборах при оптимальных показателях стандартного уплотнения грунтов  $\rho_{d\max}$  и  $W_{\text{opt}}$ . Для

уплотнения образцов грунта непосредственно перед срезом использовался станок УГПС1.

При исследовании корреляции между параметрами прочности грунта  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  и собственными конструкциями квалификационных показателей  $e_L/e$ ,  $\rho_d/e_L$  и  $\rho_d W_L$  для глинистых грунтов четвертичного возраста в диапазоне  $W_L$  от 32 до 60 % при степени уплотнения  $k_{\text{ком}} \geq 96$  % модуль  $e_L/e$  показал наилучшие результаты по связи (для  $\operatorname{tg} \varphi$  коэффициент детерминации – 0,882; для  $c$  коэффициент детерминации – 0,833) с показателями прочности, которая выражается соответствующими уравнениями (рис. 3 и 4):

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,23 + 0,33 \ln (e_L/e); \quad (3)$$

$$c = 12,18e^{0,507(e_L/e)}, \text{ кПа} \quad (4)$$

где  $e_L$  – коэффициент пористости грунта, соответствующий влажности  $W_L$ ;  $e = (\rho_s/\rho_d) - 1$  – коэффициент пористости грунта.

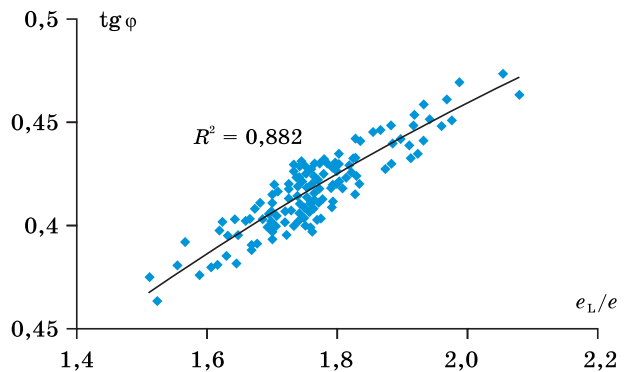


Рис. 3. Зависимость  $\operatorname{tg} \varphi = f(e_L/e)$

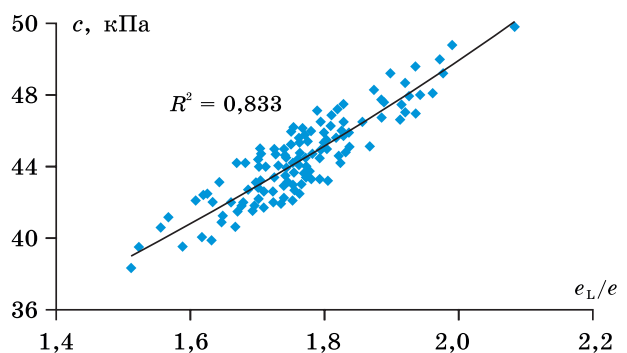


Рис. 4. Зависимость  $c = f(e_L/e)$

Учитывая возможную разницу между фактическим уплотнением грунта в теле сооружения и уплотнением образцов грунта в процессе лабораторно-экспериментальных исследований, в уравнения

(3) и (4) вводится поправочный коэффициент ( $k_c = k_{\text{comi}}/0,96$ , где  $k_{\text{comi}}$  – фактическая степень уплотнения грунта в теле плотины), устраняющий это несоответствие, т. е.

$$\text{tg } \varphi = [0,23 + 0,33 \ln (e_L/e)] k_c; \quad (5)$$

$$c = [12,18e^{0,51(eL/e)}] k_c, \text{ кПа.} \quad (6)$$

Полученные решения по оперативному определению показателей  $\text{tg } \varphi$  и  $c$  для уплотненного глинистого материала находят подтверждение в результатах сравнения с данными стандартных лабораторных экспериментов [4]: максимальная относительная погрешность в результатах сравнения не превысила 12,5 %.

**Метод оперативного определения показателя водопроницаемости уплотненного глинистого грунта.** В практике геотехнического освидетельствования грунтовых напорных сооружений, где глинистые грунты используются как строительный материал, имеют дело с движением воды под влиянием силы тяжести, обусловленной разностью напоров, т. е. с фильтрацией воды и ее количественным показателем.

В глинистых грунтах в гравитационном движении воды не участвует не только площадь, занятая частицами, но и площадь, приходящаяся на оболочки связанной воды. При одних и тех же значениях градиента напора и вязкости воды водопроницаемость зависит от размера и характера пор, через которые движется вода [1–3]. Несмотря на свою высокую пористость в естественном сложении, с точки зрения гравитационного движения воды глинистые грунты являются слабопроницаемыми, так как значительная часть воды присутствует в них в виде связанной или иммобилизованной. Узкие проходы между частицами (поры) глинистого грунта заполнены связанной водой, защемляющей в более крупных порах свободную воду, образуя как бы пробки, которые препятствуют возникновению фильтрации. При достижении некоторой разности напора преодолевается внутреннее сопротивление глинистого грунта движению воды и начинается фильтрация.

В производственных условиях при геотехническом освидетельствовании кон-

кретного уложенного в плотину глинистого грунта испытания водопроницаемости монолитных образцов наиболее надежно и с достаточной для практических целей точностью можно осуществлять по известной схеме на фильтрационной установке, которая позволяет определять коэффициент фильтрации без учета влияния нагрузки при неизменном объеме и плотности образца и при постоянном напорном градиенте [2, 3]. На основании опытных данных коэффициент фильтрации вычисляются по следующей зависимости [2–4]:

$$k_f = [Q/A T I] \tau = [Q L/A T (h + L)] \tau, \text{ см/с} \quad (7)$$

где  $k_f$  – коэффициент фильтрации при температуре 10 °С;  $A$  – площадь поперечного сечения образца;  $I$  – градиент напора;  $L$  – высота образца грунта;  $h$  – высота напорного слоя воды;  $Q$  – объем профильтровавшейся воды;  $T$  – продолжительность испытания;  $\tau = \tau_{10}/\tau_t$  – температурная поправка (здесь:  $\tau_{10}$  – температурная поправка, соответствующая температуре воды, к которой приводится коэффициент фильтрации;  $\tau_t = (0,7 + 0,03t)$  – поправка, соответствующая температуре  $t$ , при которой проводился эксперимент).

Для установления метода оперативного определения коэффициента фильтрации уплотненного глинистого грунта четвертичного возраста в диапазоне  $W_L$  от 32 до 60 % использовались результаты определения водопроницаемости образцов уплотненного глинистого грунта с фиксированным содержанием частиц менее 5 мм ( $m_{<5\text{мм}}$ ), которые вырезались из кернов, доставляемых с объектов обследования, или приготавливались при оптимальной плотности – влажности.

При исследовании корреляции между коэффициентом фильтрации  $k_f$  и принятыми к изучению конструкциями квалификационными показателями глинистого грунта конструкция квалификационного модуля  $e/(m_{<5} e_L)$  показала лучшие результаты по связи (коэффициент детерминации – 0,967) с показателем водопроницаемости  $k_f$ , которая аппроксимируется уравнением вида (рис. 5)

$$k_f = 13,49 [e/(m_{<5} e_L)]^{3,17} 10^{-7}, \text{ см/с} \quad (8)$$

где  $e$  – коэффициент пористости уплотненного в сооружении грунта [ $e = (\rho_s/\rho_d) - 1$ ];  $e_L = (\rho_s W_L)/\rho_w$  – коэффициент пористости грунта, соответствующий

влажности на границе текучести  $W_L$ ;  $m_{<5}$  – содержание в пробе грунта частиц размером менее 5 мм, отн. ед.

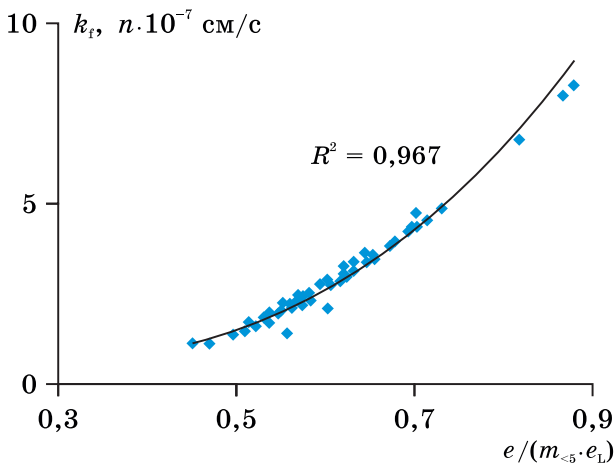


Рис. 5. Зависимость  $k_f = f[e/(m_{<5} e_L)]$

Учитывая возможную разницу между фактическим уплотнением грунта в теле сооружения и уплотнением образцов грунта при лабораторно-экспериментальных исследованиях, в уравнение (8) вводится поправочный коэффициент  $k'_c = 0,96/k_{comi}$  ( $k_{comi}$  – фактическая степень уплотнения грунта в теле плотины), устраняющий это несоответствие, т. е.  $k_f = [13,49 [e/(m_{<5} e_L)]^{3,17} 10^{-7}] k'_c$ , см/с. (9)

Полученная зависимость по оперативному определению показателя водопроницаемости уплотненного глинистого материала находит подтверждение в данных сравнения с результатами лабораторных экспериментов: максимальная относительная погрешность в результатах сравнения не превысила 12,7 %.

**Выводы**

На основе анализа экспериментальных исследований установлены квалификационные показатели глинистых грунтов, представляющие собой совокупность известных, периодически контролируемых и достаточно легко определяемых показателей физических

свойств, объединенных в один модуль и являющихся многофакторными критериями состояния грунтов в уплотненном состоянии, что делает их удобными для оперативного определения таких геотехнических показателей, как параметры стандартного уплотнения  $\rho_{dmax}$  и  $W_{opt}$ , прочности  $tg \phi$  и  $c$  и водопроницаемости  $k_f$ .

1. **Андреев Е. В.** Совершенствование методов оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин: дис. ... канд. техн. наук. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 211 с.

2. **Жарницкий В. Я.** Обеспечение качества и надежности каменно-земляных плотин при строительстве. – Иваново: изд-во ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2005. – 156 с.

3. **Жарницкий В. Я.** Оперативный геотехнический контроль в обеспечении качества устройства каменно-земляных плотин и прогноз их деформаций по результатам строительства. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 172 с.

4. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве: РД 34.15.073 91. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991. – 436 с.

Материал поступил в редакцию 11.11.13.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью»  
Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru

**Андреев Евгений Владимирович**, кандидат технических наук  
Тел. 8-926-264-43-07

**Жарницкая Надежда Федоровна**, старший преподаватель  
Тел. 8-909-249-87-20