



**ЖЕРЕБЯТЬЄВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів Національного університету водного господарства і природокористування (м. Рівне), член Міжнародного товариства механіки ґрунтів, геотехніки і фундаментобудування.

Основні напрямки діяльності: будівництво і експлуатація ґрунтових гребель в складних умовах, дослідження причин деформацій і аварій споруд підсилення споруд.

Автор понад 40 наукових праць.

E-mail: alexzh21@yandex.ru

УДК 627.132

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ МНОГОФАКТОРНОГО УЧЕТА СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ключевые слова: математическое планирование, свойства грунта, грунтовые сооружения, проектирование

*Рассмотрены возможности использования методов планирования эксперимента при проектировании и строительстве грунтовых водоподпорных сооружений. Предложены новый способ определения нормативных и расчетных характеристик грунтов в насыпи и метод геотехнического контроля.*

*Розглянуті можливості використання методів планування експеримента при проектуванні і будівництві ґрунтових водопідпирних споруд. Запропоновано новий спосіб визначення нормативних і розрахункових характеристик ґрунтів в насипах і метод геотехнічного контролю.*

*Possibilities of use of methods of mapping out of experiment are considered at designing and building of soil water retaining constructions. Are offered a new way of definition of standard and settlement characteristics of priming coats in banks and a method of the geotechnical supervisory control.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема увязки проекта грунтового сооружения с реальными свойствами грунтов, находящихся в разведанных карьерах является актуальной. С одной стороны есть карьеры с грунтами, имеющими природную неоднородность зернового состава, влажности, а с другой мы имеем запроектированные сооружения и должны быть уверены, что эти карьеры годятся для их возведения, и знания того, что будет на выходе в конструкции, а также какова степень пригодности этих карьеров. Часто карьерные грунты бракуются или необходимо работать над ними дополнительно, чтобы получить выход материала в нужном объеме.

Другой стороной этой проблемы, является назначения адекватных характеристик грунтов при проектировании и строительстве грунтовых водоподпорных сооружений, обеспечивающих их надежность.

Согласно действующим нормам [1] нормативные и расчетные значения характеристик грунтов (прочность, деформационные и фильтрационные показатели) следует устанавливать статистической обработкой результатов полевых и лабораторных определений. Плотность сложения грунта в земляных насыпных, каменно-земляных и каменно-набросных плотинах в свою очередь следует назначать с учетом:

- а) исследований свойств грунтового материала и расположения его в теле плотины (как по высоте, так и по элементам профиля);
- б) внешних нагрузок;
- в) напряженно-деформированного состояния;



г) способа отсыпки и уплотнения грунтового материала и интенсивности возведения.

Плотность сложения грунта рекомендуется назначать переменной по высоте плотины. При этом, учитывая изменение его физико-механических свойств в процессе строительства и эксплуатации сооружения, более плотный грунт необходимо размещать в нижней части плотины.

Однако в нормах не определены практические приемы и рекомендации как осуществить увязку неоднородности грунтов с технологией возведения и работой конструкции плотины и как достигнуть оптимальности при решении этих задач. На практике часто бывает невозможно добиться установленной проектантами плотности для всего объема карьерного грунта или, наоборот, назначается заниженная величина плотности.

Не принижая полезность существующих в практике подходов к проектированию (метод аналогии, физическое и математическое моделирование) рассмотрим решение этих задач с точки зрения непосредственной количественной оценки свойств грунтов связанных с работой конструкции плотины или противодиффузионного элемента на основе многофакторных эмпирических данных.

**Многофакторный анализ на основе математического планирования эксперимента (МПЭ)** – это тот инструмент, который позволяет использовать физические показатели грунта, его зерновой состав, влажность, минеральный состав и представить, какими будут основные показатели определяющие работоспособность сооружения, то есть его прочность, устойчивость его откосов, отсутствие выходов воды на водоупорных элементах и т.д. Для этой оценки и нужны расчетные показатели, количественно связанные с физическими свойствами грунтов, технологией и напряженным состоянием материала в сооружении (рис. 1).

Профессор Л.Н.Рассказов решил задачу оптимизации конструкции грунтовых плотин [2] на стадии проектирования. Он варьировал расчетными характеристиками грунтов, прочностными и деформационными. Однако эта задача требует определения прочностных, деформационных характеристик с учетом их природной физической неоднородности и технологических – производственных факторов. В настоящей работе на примере грунтовых сооружений Днестровской ГАЭС показано, насколько разброс физических природных показателей влияет на расчетные параметры и как увязать решение этих вопросов.

В 1989 году вышли Рекомендации [3] имеющие более широкое методическое значение, представляющие практический интерес для возведения разнообразных грунтовых сооружений (плотин, дамб хвостохранилищ, золоотвалов, искусственных территорий), разными способами (отсыпкой, намывом с применением и без применения технической мелиорации) и из разных грунтов от крупнообломочных до тонкодисперсных при их повышенной неоднородности. Однако проектные организации, насколько известно автору, пока избегают применять данную методику. Причиной тому, очевидно, является отсутствие у проектантов и изыскателей навыков в использовании МПЭ на практике и определенная инертность мышления.

**Днестровская ГАЭС**, одна из наибольших в мире, строится в Черновицкой области на реке Днестр с 1983 года. Основными функциями Днестровской ГАЭС является регулирование частоты и графика нагрузки в энергосистеме Украины, формирование аварийного резерва электроэнергии. Проектом Днестровской ГАЭС предусмотрено

введение семи агрегатов суммарной мощностью 2268 МВт в турбинном и 2947 МВт в насосном режимах. По масштабности – это шестая ГАЭС в мире и самая мощная в Европе.

**Грунтовые сооружения** Днестровской ГАЭС входят в состав верхнего бассейна, размещенного на плато на высоте более 140м над природным уровнем воды в р.Днестр, представлены дамбой длиной 7,5 километров и высотой 20-25 метров и глинистым экраном. Общая площадь верхнего бассейна ГАЭС составляет 250га. От надежности экрана и дамб зависит не только безаварийная работа гидроагрегатов ГАЭС, но и устойчивость днестровского склона, а значит, и безопасность гидроэнергетического объекта в целом.

Сейчас для ввода в действие 1-го агрегата Днестровской ГАЭС создана часть верхнего бассейна, которая отделена от остальной части временной дамбой. Положение временной дамбы позволяет обеспечить эксплуатацию первой очереди ГАЭС – трех агрегатов. Общий объем земляных работ для возведения первой очереди сооружений верхнего бассейна ГАЭС составил примерно 15 млн. кубометров грунта.

В ходе изыскательских и проектных работ было установлено, что основным фактором, который в первую очередь обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию верхнего бассейна Днестровской ГАЭС является водонепроницаемость глинистого экрана, и, как следствие, недопущение обводнения днестровского склона на участках основных сооружений.

Конструкция экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС представляет собой двухметровый слой уплотненного глинистого грунта который укладывается на бетонную подготовку толщиной 0,5м на известняковом основании. Уплотнение грунтов в начальной стадии строительства экрана (1987-95гг) осуществлялось катками статического действия давлением  $\sigma=0,5-1,0\text{МПа}$  до значения плотности  $\rho_d \geq 1650\text{кг/м}^3$  при обеспеченности  $p=90\%$  в соответствии с проектом. Необходимое значение коэффициента фильтрации грунта при этом составляет  $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}\text{см/с}$ . Такое значение коэффициента фильтрации обусловлено необходимостью поддержания природного склона в состоянии равновесия по результатам моделирования процесса фильтрации (для обеспечения сухого состояния откоса).

В зоне размещения полезных выемок верхнего водоема Днестровской ГАЭС залегают четвертичные эолово-делювиальные  $eo-d Q_4$ , делювиально-пролювиальные  $d-p Q_{2,3}$  супеси, суглинки и глины, а также неогеновые аллювиальные  $alN_2^3$  глины, которые переходят ниже в песчано-гравийный грунт древнего русла Днестра. Толщина четвертичных отложений от 2 до 30-40м (в местах оврагов и балок), неогеновых – 3-10м. Характерной особенностью грунтов, предназначенных для укладки в сооружения верхнего бассейна Днестровской ГАЭС является их неоднородность зернового состава, влажности, а следовательно механических свойств и проницаемости в насыпи экрана и дамб. Характеристики грунтов, их изменчивость представлены в табл. 1.

Уже в начале строительства экрана верхнего бассейна выяснилось, что достигнуть проектного значения плотности и коэффициента фильтрации в теле экрана во всем объеме карьерного грунта, вследствие его неоднородности, невозможно. Ответственность сооружений предопределила необходимость поиска как технологических приемов для повышения плотности грунта, а именно:



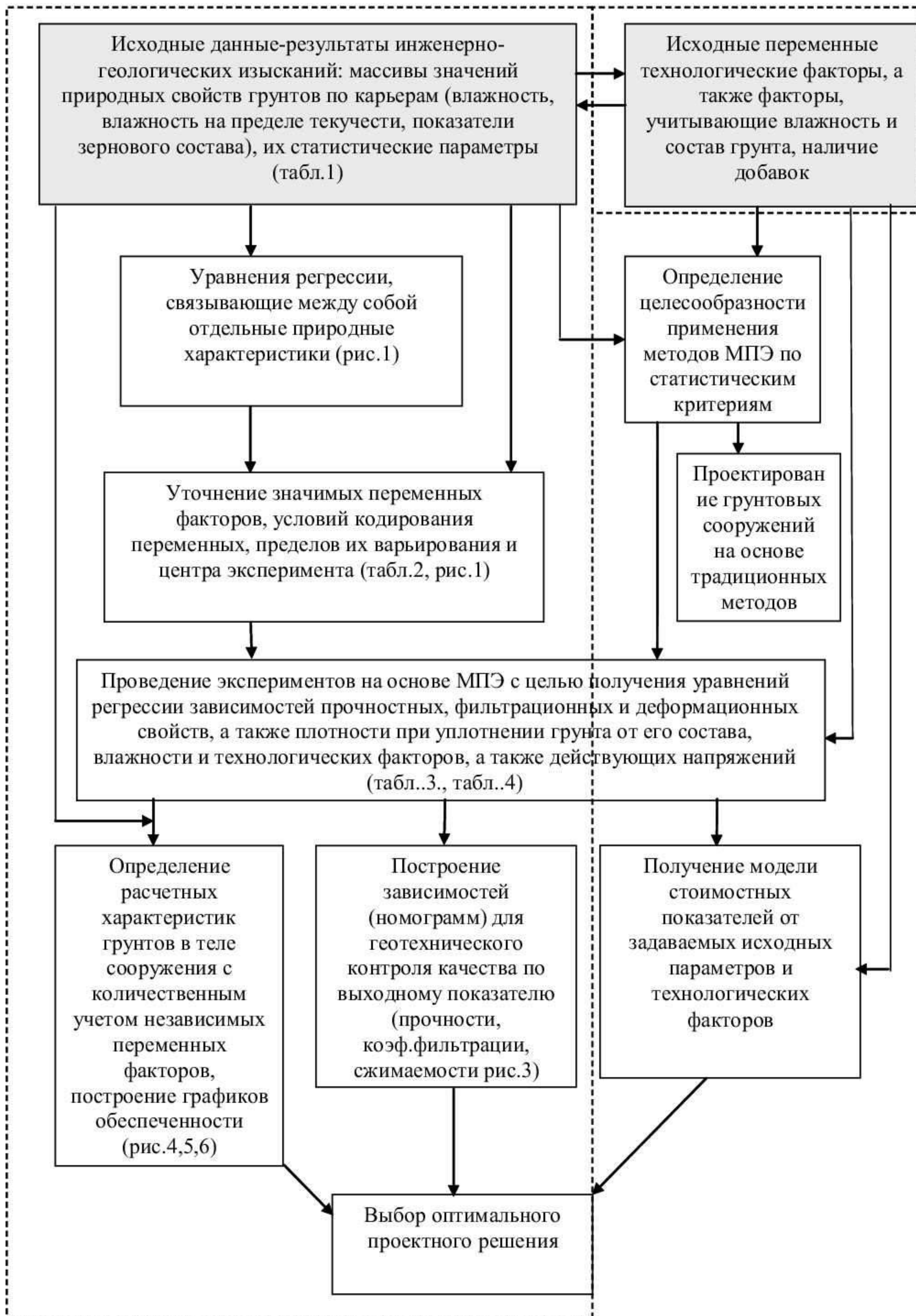


Рис. 1. Структурно-логическая схема многофакторного проектирования грунтовых сооружений на основе МПЭ (пунктиром ограничена часть действий, рассмотренных в данной статье).



Таблица 1. Статистические характеристики свойств суглинков eo-dQ2-3, d-pQ3-4, предназначенных для экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС, полученные по данным изысканий

№	Показатель (физическая характеристика)	Количество опытных точек, $n$	Размерность	Среднее значение, $X_n$	Дисперсия, $S^2$	Средне-квадратическое отклонение, $S$	Коэффициент вариаций, $V$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Влажность, $W$	190	доли ед.	0,190	0,0014	0,0378	0,198
2	Число пластичности, $I_p$	190	доли ед	0,199	0,0024	0,0488	0,246
3	Влажность на пределе текучести, $W_L$	190	доли ед	0,391	0,0039	0,0621	0,159
4	Содержание песчаных частиц	22	%	24,2	220,8	14,5	0,599
5	Содержание пылеватых частиц	22	%	48,8	135,2	11,4	0,233
6	Содержание глинистых частиц	22	%	27,4	64,5	7,8	0,286

применение более тяжелых катков, катков с вибрацией, обработка грунтов на карте отсыпки, отсыпка грунтов в воду, кондиционирование грунтов в промежуточных кавальерах так и конструктивных мероприятий – использование водонепроницаемых мембран. С другой стороны была учтена многофакторная зависимость влияния переменного состава глинистого грунта, влажности и плотности на коэффициент фильтрации грунта в экране. Применительно к откосным частям экрана дамб в качестве определяющих рассматривались также прочностные свойства грунтов.

Структурно-логическая схема многофакторного проектирования отработанная в процессе строительства верхнего бассейна Днестровской ГАЭС представлена на рис.1.

Опыт применения планирования эксперимента [3,4] в исследованиях грунтов и опыт многофакторного учета свойств грунтов при проектировании показывает, что целесообразность их применения (на основе статистических гипотез и критериев) определяется неоднородностью природных свойств в объеме разведанного карьера. Практически целесообразно проводить многофакторный анализ уже при коэффициенте вариаций основных физических свойств в природных карьерах, от которых зависят прочность, деформации или фильтрационная способность имеющих значение  $V \geq 0,1$ . Как видно из табл.1 величина коэффициента вариаций показателей грансостава, влажности на пределе текучести и влажности, то есть тех свойств от которых зависит плотность в сооружении, водонепроницаемость и прочность грунта [5] превышает эту величину. Таким образом есть основания использовать в данном случае МПЭ для раскрытия неопределенностей и уточнения влияния технологических факторов на конечные свойства грунта.

Пределы варьирования переменными факторами (влажность  $W(X_2)$  и влажность на пределе текучести  $W_L(X_3)$ , табл.2) задавались исходя из рассеяния опытных точек, полученного при изысканиях (рис.2). Выбор этих пределов осуществлялся исходя из условия максимального охвата областью варьирования переменных природных свойств грунтов и возможностей изменения их в сооружении. (При этом область высоких значений влажности на пределе текучести ограничена величиной  $W_L=0,438$  выше которой водопроницаемость грунта в экране будет заведомо меньше требуемой величины при обеспечении

монолитной структуры сложения грунта.)

Следует отметить, что свойство МПЭ назначать область переменных независимых факторов существенно отличает его от обычного («пассивного») эксперимента, где данная возможность отсутствует. Поэтому независимые исходные переменные (влажность, влажность на пределе текучести, плотность сухого грунта  $\rho_d(X_4)$ ) в последнем случае назначаются случайным образом, а результаты опытов не имеют той представительности, что в случае с использованием МПЭ и могут иметь смещенные значения относительно фактических физических свойств грунтов в сооружении.

Для получения количественных – полиномиальных зависимостей были использованы ортогональные двуровневые  $2^k$  и трехуровневые  $3^k$  (где  $k$  – количество независимых переменных факторов) планы полного факторного эксперимента (табл.3).

Эксперименты по лабораторному уплотнению грунтов проводили по методике циклических нагрузок [6] ВНИИГ. Уплотняющее давление  $\sigma_c(X_1)$  изменялось в пределах 0,2-1,0 МПа в соответствии с планом. Количество циклов уплотнения составляло 10. Влажность изменялась в пределах 0,14-0,30. Все эксперименты проводили в трех повторениях в каждой точке плана. Кроме того уравнение 2, табл.4 было получено в результате регрессионного анализа многофакторной статистической обработкой результатов опытного уплотнения грунтов в экране по методу наименьших квадратов. Полученные уравнения отражают известные из грунтоведения зависимости для связных грунтов (наличие оптимальной влажности и плотности).

Эксперименты по определению коэффициента фильтрации выполнялись по действующей методике [7] на приборе Ф-1М. Влажность  $W(X_2)$ , влажность на пределе текучести  $W_L(X_3)$ , плотность сухого грунта  $\rho_d(X_4)$  задавались в соответствии с планом (табл.3). Прикладывался градиент напора, который равнялся среднему его значению в конструкции экрана  $I=6,0$ . В процессе измерения объема воды которая профильтровалась через образец грунта вводили температурную поправку. Результаты экспериментов в виде полиномиальных уравнений представлены в табл.4 (3). Это уравнение отражает известную зависимость изменения коэффициента фильтрации от плотности и влажности на пределе текучести. Графическая интерпретация данного уравнения представлена на рис.3.



Таблиця 2.

Условия планирования эксперимента по определению уплотняемости и коэффициента фильтрации и сопротивления сдвигу грунтов экранов верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

Независимые переменные	Формулы перехода к кодированным величинам	Уровни варьирования переменных				Интервал варьирования
		При влажности на пределе текучести	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6	7
Определение уплотняемости						
Уплотняющее давление, $\sigma_c$ , МПа	$X_1 = \frac{\sigma - 0,6}{0,4}$	-	0,2	0,6	1,0	0,4
Влажность, $W$ , доли ед.	$X_2 = \frac{1}{0,27} \left( \frac{W}{0,207 - 0,293W_L + 0,642W_L^2} - 1 \right)$	0,438 0,350 0,256	0,148 0,134 0,127	0,202 0,183 0,174	0,256 0,233 0,222	0,054 0,051 0,048
Влажность на пределе текучести, $W_L$ , доли ед.	$X_3 = \frac{W_L - 0,347}{0,091}$	-	0,256	0,347	0,438	0,091
Определение коэффициента фильтрации						
Плотность сухого грунта, $\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	$X_4 = \frac{\rho_d - 947 - 354W_L + 4785W_L^2}{100}$	0,438 0,350 0,256	1480 1500 1440	1580 1600 1540	1680 1700 1640	100 100 100
Коэффициент водонасыщения, $S_r$ , доли ед.	$X_5 = \frac{S_r + 1,396 - 11,147W_L + 14,162W_L^2}{0,13}$	0,438 0,350 0,256	0,64 0,64 0,40	0,77 0,77 0,53	0,90 0,90 0,66	0,13 0,13 0,13
Определение сопротивления сдвигу (карьер Волошково, для откосной части экрана дамб)						
Нормальные напряжения, $\sigma$ , кПа	$X_{10} = \frac{\sigma - 200}{100}$	-	100	200	300	100
Влажность на пределе текучести, $W_L$	$X_3 = -238,65W_L^2 + 167,33W_L - 28,242$	-	0,257	0,283	0,37	0,026; 0,087



Таблица 3. Матрица планирования и результаты экспериментов по определению коэффициента фильтрации грунтов экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

Точки плана	Факторы		Влажность на пределе текучести, $W_L$	Плотность, $\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	Влажность, $W$ , д.е.	Результаты эксперимента, коэффициент фильтрации, см/с			Выходной параметр $Y = -\ln k_f$
	$X_4, (\rho_d)$	$X_5, (S_r)$				$k_{f1}$	$k_{f2}$	$k_{f3}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0,256	1640	0,156	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$	10,129
2	-1	1	0,256	1440	0,212	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	8,951
3	1	-1	0,256	1640	0,095	$5,14 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^{-5}$	9,792
4	-1	-1	0,256	1440	0,129	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-4}$	8,295
5	1	1	0,350	1700	0,194	$5,22 \cdot 10^{-9}$	$4,19 \cdot 10^{-9}$	$4,36 \cdot 10^{-9}$	19,291
6	-1	1	0,350	1500	0,264	$3,35 \cdot 10^{-9}$	$6,04 \cdot 10^{-9}$	$4,53 \cdot 10^{-9}$	19,220
7	1	-1	0,350	1700	0,138	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$3,85 \cdot 10^{-8}$	$3,32 \cdot 10^{-8}$	17,229
8	-1	-1	0,350	1500	0,188	$7,44 \cdot 10^{-6}$	$7,77 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-7}$	13,096
9	1	1	0,438	1680	0,200	$3,98 \cdot 10^{-9}$	$6,91 \cdot 10^{-9}$	$5,31 \cdot 10^{-9}$	19,066
10	-1	1	0,438	1480	0,272	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$9,08 \cdot 10^{-5}$	$5,90 \cdot 10^{-4}$	8,139
11	1	-1	0,438	1680	0,142	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$1,66 \cdot 10^{-8}$	17,922
12	-1	-1	0,438	1480	0,194	$9,51 \cdot 10^{-6}$	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	11,641

Для грунтов предназначенных к укладке в наклонную часть экрана дамб (карьер Волошково) определялась также зависимость прочности на сдвиг от влажности на пределе текучести и нормальных сжимающих напряжений  $\sigma(X_{10})$  (табл.2,4).

Опыты во всех случаях проводились с грунтами, отобранными непосредственно в забоях карьеров. Высыхание проб грунтов не допускалось.

В процессе получения полиномиальных уравнений производилась проверка значимости коэффициентов полиномов, статистических критериев однородности дисперсии Кохрена, адекватности и информационной способности Фишера [3,4]. Статистические параметры уравнений имеют оптимальную величину.

Полученные уравнения имеют вид неполных квадра-

тичных полиномов (табл.4) которые и использовались в качестве управляющих уравнений для решения поставленных задач. В рассматриваемом случае на основании этих уравнений определялись нормативные и расчетные значения коэффициента фильтрации грунта, прочности на сдвиг в теле экрана Днестровской ГАЭС, а также построение расчетных графиков обеспеченности.

**Прогнозирование свойств грунтов**, которые укладывались в горизонтальную и наклонные части экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС осуществлялось по данным изысканий и геотехнического контроля на начальной стадии строительства.

Для построения графиков обеспеченности прогнозируемых характеристик грунтов и определения расчетных их значений использовалась такая методика: для каждой

Таблица 4. Уравнения регрессии (полиномиальные модели) которые были получены в результате опытов по методам планированного эксперимента и на основе регрессионного анализа

№	Наименование математической модели	Уравнение регрессии	Статистические критерии			
			$S_f^2$	$S_2^2$	$F_u$	$F_{табл}$
1	Зависимость плотности сухого грунта от влажности на пределе текучести, влажности и уплотняющего давления	$\rho_d = 1572,8 + 73,1X_1 + 86,8X_2 - 17,5X_3 - 24,2X_1^2 - 15,3X_2^2 - 4,0X_3^2 - 45,8X_1X_2 + 33,9X_1X_3 + 20,7X_2X_3$	3186	13105	4,1	2,1
2	* Зависимость плотности сухого грунта от влажности на пределе текучести и влажности	$Y = -0,004 - 0,676X_2 + 0,006X_3 - 0,305X_2^2 + 0,026X_3^2 + 0,115X_2X_3$	3142	387	8,1	1,3
3	Зависимость коэффициента фильтрации от влажности на пределе текучести, плотности и коэффициента водонасыщения	$Y = 17,21 + 0,57X_5 + 2,01X_4 + 2,45X_3 + 0,001X_5^2 + 0,001X_4^2 - 5,470X_3^2 + 0,02X_4X_5 + 0,42X_5X_3 + 1,82X_4X_3$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	7,6	5,9
4	Зависимость сопротивления сдвигу от влажности на пределе текучести и действующих нормальных напряжений	$\tau = 125,4 + 0,5X_3 + 54,3X_{10} + 2,9X_3^2 - 2,1X_{10}^2 - 3,3X_3 \cdot X_{10}$	15,2	2220	146	3,8

где  $X_1$ -уплотняющее давление при циклической нагрузке (кодированное значение);  $X_2$ -влажность (кодированное значение);  $X_3$ -влажность на пределе текучести (кодированное значение);  $X_4$ - плотность сухого грунта (кодированное значение);  $X_5$ - начальное значение коэффициента водонасыщения (кодированное значение);  $X_{10}$ -нормальные напряжения (кодированное значение);  $Y = -\ln k_f$ ;  $k_f$ - коэффициент фильтрации;  $S_{f^2}$  -дисперсия адекватности;  $S_{2^2}$  -дисперсия относительно общего среднего.

Уравнение №2 получена в результате многофакторного регрессионного анализа результатов опытных отсыпок грунтов верхнего бассейна на начальной стадии строительства, в этом уравнении  $X_2 = \frac{W - 0,2282}{0,226}$ ;  $X_3 = \frac{W_L - 0,3849}{0,366}$ ;  $Y = \frac{\rho_d - 1,6148}{0,520}$ .



пары частных значений влажности  $W_i(X_{2i})$  и влажности на пределе текучести  $W_i(X_{3i})$  из выборок данных изысканий по формулам (1,2) из табл.4 путем их подстановки в это уравнение рассчитывалось значение плотности сухого грунта в соответствии с результатами экспериментов по уплотняемости на основе МПЭ. При этом моделировались переменные значения уплотняющей нагрузки  $\sigma_c(X_1)$  и различные значения влажности грунта и влажности на пределе текучести. Затем для каждой пары значений рассчитывалась величина коэффициента водонасыщения грунта по формуле:

$$S_r = \frac{W_p \rho_d}{(\rho_s - \rho_d) \rho_w}, \quad (1)$$

где  $\rho_s$  - плотность частиц грунта;  $\rho_d$  - плотность сухого грунта полученная по формулам (1,2) из табл.4;  $\rho_w$  - плотность воды.

После этого по формуле (3) табл.4 теперь уже для каждой тройки значений влажности на пределе текучести, плотности и коэффициента водонасыщения  $S_r(X_{5i})$  рассчитывалось значение коэффициента фильтрации грунта. Кодирование и декодирование значений переменных осуществлялось по формулам из табл.2. В результате этих расчетов получен массив значений коэффициента фильтрации грунта и сопротивления сдвигу по которому производилось построение прогнозируемых графиков обеспеченности при различных технологических факторах и переменных природных параметрах (уплотняющее давление  $\sigma_c(X_1)$  или влажность рис.4, сжимающие напряжения  $\sigma(X_{10})$  рис.6).

Нормативное значение коэффициента фильтрации (или другой характеристики, которая рассчитывается по полиномиальным уравнениями) определяли по формуле:

$$\hat{Y}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i, \quad (2)$$

где,  $\hat{Y}_i$  - значение характеристики, которое находится по полиномиальному уравнению (табл.4) при данных значениях независимых переменных факторов ( $X_{ui}$ );  $n$  - количество опытных точек, включающее весь объем изысканий,  $i$  - порядковый номер независимого переменного фактора.

Количественная оценка коэффициента фильтрации грунта в теле экрана, показала, что расчетное значение, полученное по данным геотехнического контроля несколько больше значения, полученного при моделировании уплотнения грунта в опытах и дальнейшего расчета по полиномиальным моделями (рис.5). При обеспеченности 50% имеем соответственно  $1,4 \cdot 10^{-8}$  см/с для данных геотехконтроля и  $7,8 \cdot 10^{-9}$  см/с – прогнозируемое значение по данным изысканий, что не удовлетворяло требуемому значению при моделировании фильтрации из условия необводнения днестровского склона  $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$  см/с при 90% обеспеченности. В результате этой оценки было рекомендовано переработать верхний (метровый) слой грунта экрана и уложить его с уплотнением вибрационными катками. Такое решение обосновано также и тем, что в результате длительного лежания практически незащищенного экрана (в период экономического упадка 1995-2001гг) в его поверхностном слое образовались трещины выветривания.

Среднеквадратическое отклонение и дисперсию относительно найденного нормативного значения определяли по формуле

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{Y}_n - \hat{Y}_i)^2}{n-1}}. \quad (3)$$

Для откосных частей экрана дамб определяющим параметром является в первую очередь прочность грунта. Для построения соответствующей математической модели были проведены опыты и получен полином (4. табл.4). Данное уравнение позволило существенно уточнить угол внутреннего трения и удельное сцепление, а также провести поверочные расчеты устойчивости с учетом реальных значений плотности, Влажности и влажности на пределе текучести.

В дальнейшем находили нормативные и расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления по найденным величинам сопротивлений сдвигу. Для этого в полином 4 (табл.4) подставлялись значения влажности на пределе текучести  $W_L(X_{3i})$  из данных изысканий. В результате построены графики обеспеченности сопротивления грунта сдвигу (рис.6) и найдены расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления которые составляют  $\varphi_n = 21,3$  град,  $c_n = 23,8$  кПа. При этом коэффициент надежности для грунта, найденный для этих случаев составляет  $\gamma_g = 1,004 \dots 1,03$ . В то время, как при стандартном подходе этот коэффициент  $\gamma_g = 1,15 \dots 1,5$ . Таким образом, многофакторные расчеты характеристик прочности грунта позволяют повысить надежность определения расчетных показателей и вместе с тем надежность расчетов грунтовых сооружений по первой группе предельных состояний.

**Среди преимуществ** данного способа определения нормативных характеристик следует отметить: количественный учет всей совокупности физических характеристик полученных при лабораторном изучении свойств грунтов в процессе изысканий (которые при традиционном способе имеют лишь вспомогательное значение); максимальное приближение нормативного значения к величине математического ожидания искомой характеристики; снижение величины общей дисперсии вследствие центрирования массива данных физических свойств, т.е. увеличение точности определения расчетной характеристики.

**Немаловажным аспектом применения МПЭ в практике строительства грунтовых сооружений из неоднородных грунтов является «гибкий» геотехнический контроль.** Он заключался в том, что для неоднородных грунтов в качестве контрольного параметра использовалось не фиксированное значение плотности грунта, а значение показателя определяющего работоспособность грунта в данном случае – коэффициент фильтрации  $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$  см/с. В случае горизонтального экрана Днестровской ГАЭС использовалось уравнение (3) из табл. 4. С этой целью плотность, влажность и влажность на пределе текучести определялись для каждого образца грунта, отобранного из насыпи, и для этих значений по формуле 3 (табл.4) рассчитывали значение коэффициента фильтрации. Потом это значение сравнивали с величиной допустимого коэффициента фильтрации  $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$  см/с. Для удобства оперативного контроля проведена графическая интерпретации этой зависимости (рис.3). Коэффициент фильтрации, удовлетворяющий проектным требованиям может быть получен для правой нижней части данной номограммы.

Данный способ позволил существенно ускорить процесс отсыпки поскольку перед этим приходилось останавливать отсыпку при получении величины плотности ниже  $1650 \text{ кг/м}^3$  при «жестком» геотехническом контроле.



## ВЫВОДЫ:

1. МПЭ позволяет внести четкую логику в процесс определения статистически обоснованных расчетных характеристик свойств, определяющих работоспособность грунта в сооружении, формализовать условия проведения экспериментов с неоднородными карьерными грунтами и интерпретацию их результатов.
2. Эффективность применения МПЭ при проектировании и строительстве грунтовых сооружений достигается за счет:
  - а. количественной увязки природных физических свойств грунтов, значений плотности после уплотнения с водопроницаемостью, сопротивлением сдвигу и возможностью их регулирования;

- б. существенно большей представительности в расчетных характеристиках данных изысканий;
- в. увеличения точности определения расчетных характеристик при оптимальных затратах ресурсов.
3. Кроме того появляется возможность «гибкого» геотехнического контроля при отсыпке неоднородных грунтов, по определяющему работоспособность параметру что облегчает процесс производства и контроля земляных работ.
4. Облегчается принятие обоснованных инженерных решений по выбору оптимальной технологии укладки грунтов и рациональному использованию местных грунтов.
5. Все вышеперечисленное положительно сказывается на надежности расчетов, а значит и самого сооружения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.06.05-84\* Плотины из грунтовых материалов -. -М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 32 с.
2. Рассказов Л.Н., Орехова И.Л. Оптимизация конструкций грунтовых плотин // Гидротехническое строительство, 1985.- №7. –С.32-37.
3. Рекомендации по многофакторной оценке свойств грунтов, укладываемых в земляные сооружения ПЗ6-87/ВНИИГ. Л. Энергия.- 1989.-78с.
4. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука.- 1971.-254с.
5. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зянгиоров Р.С. и др. Грунтоведение.- Изд-во Московского ун-та, 1983. -388с.
6. Руководство по лабораторному определению оптимальных значений влажности и объемного веса скелета связных грунтов применительно к уплотнению катками. П08-73/ВНИИГ.- Ленинград: Энергия.- 1975
7. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость. 12-83/ВНИИГ.- Ленинград: Энергия, 1983
8. Жеребятёв А.В. Применение методов планирования эксперимента для оптимизации зависимости уплотняемости несвязных крупнообломочных грунтов от зернового состава // Энергетическое строительство, 1987, № 12, с. 39-42.
9. Стефанишин Д.В., Жеребятёв О.В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС // Вісник Національного університету водного господарства і природокористування Збірник наукових праць. Частина 1, вип.. - Рівне,. 2009.- С.520-530



# РИСУНКИ К СТАТЬЕ ЖЕРЕБЯТЬЕВА А.В. "ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ МНОГОФАКТОРНОГО УЧЕТА СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИСТРОИТЕЛЬСТВЕ ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ"

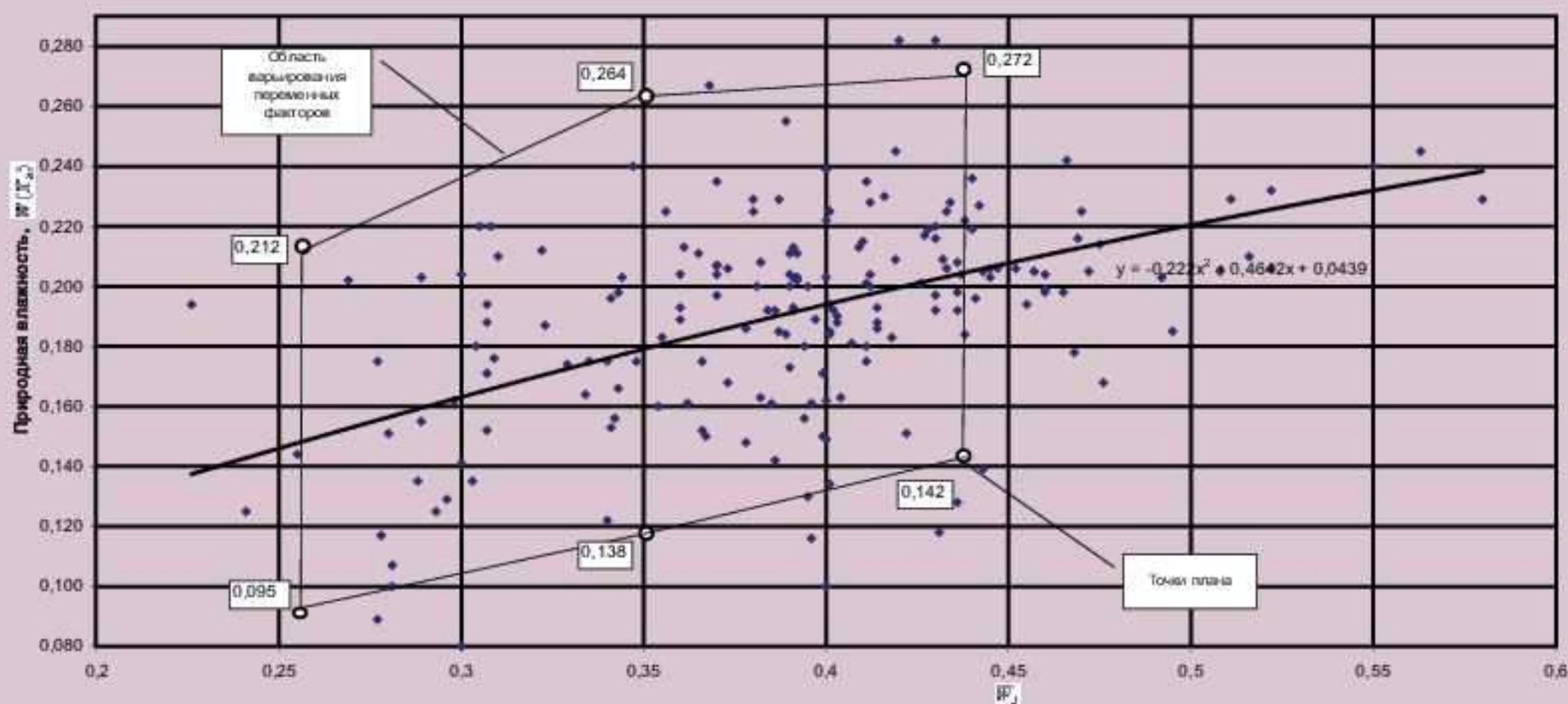


Рис. 2 Точечный график зависимости природной влажности грунта (данные изысканий) от влажности на пределе текучести, план эксперимента по определению коэффициента фильтрации

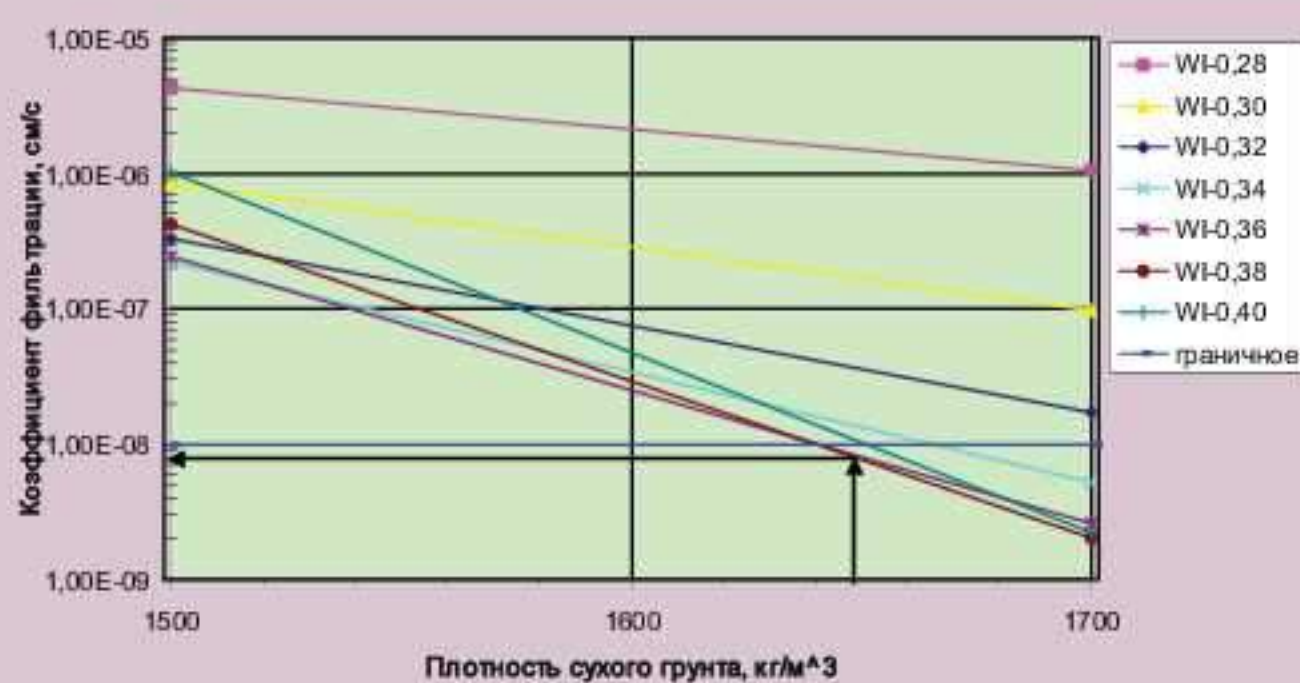


Рис. 3 Зависимость коэффициента фильтрации от плотности сухого грунта и влажности на пределе текучести

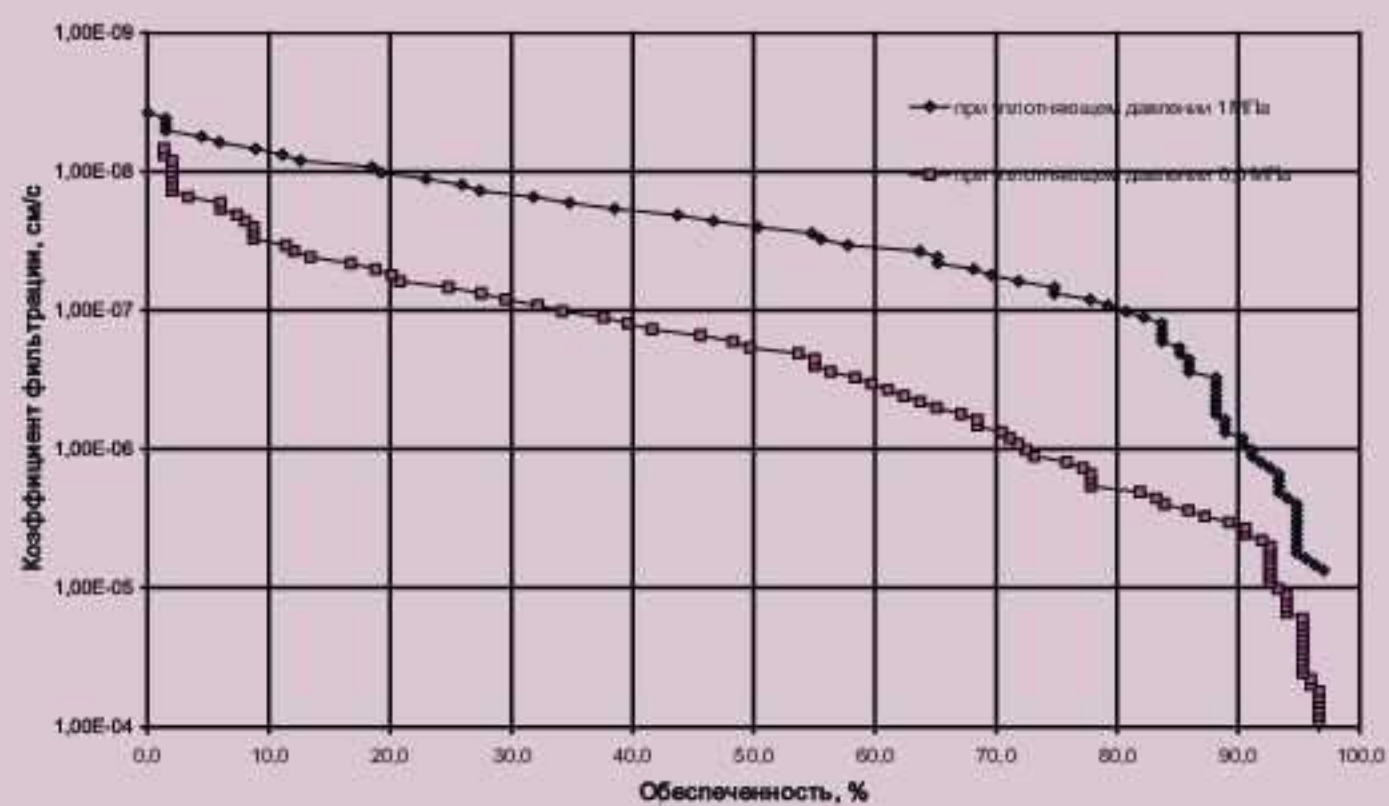


Рис. 4 Графики обеспеченности коэффициента фильтрации грунтов карьера Волошково (предназначенных для наклонной части экрана дамб)

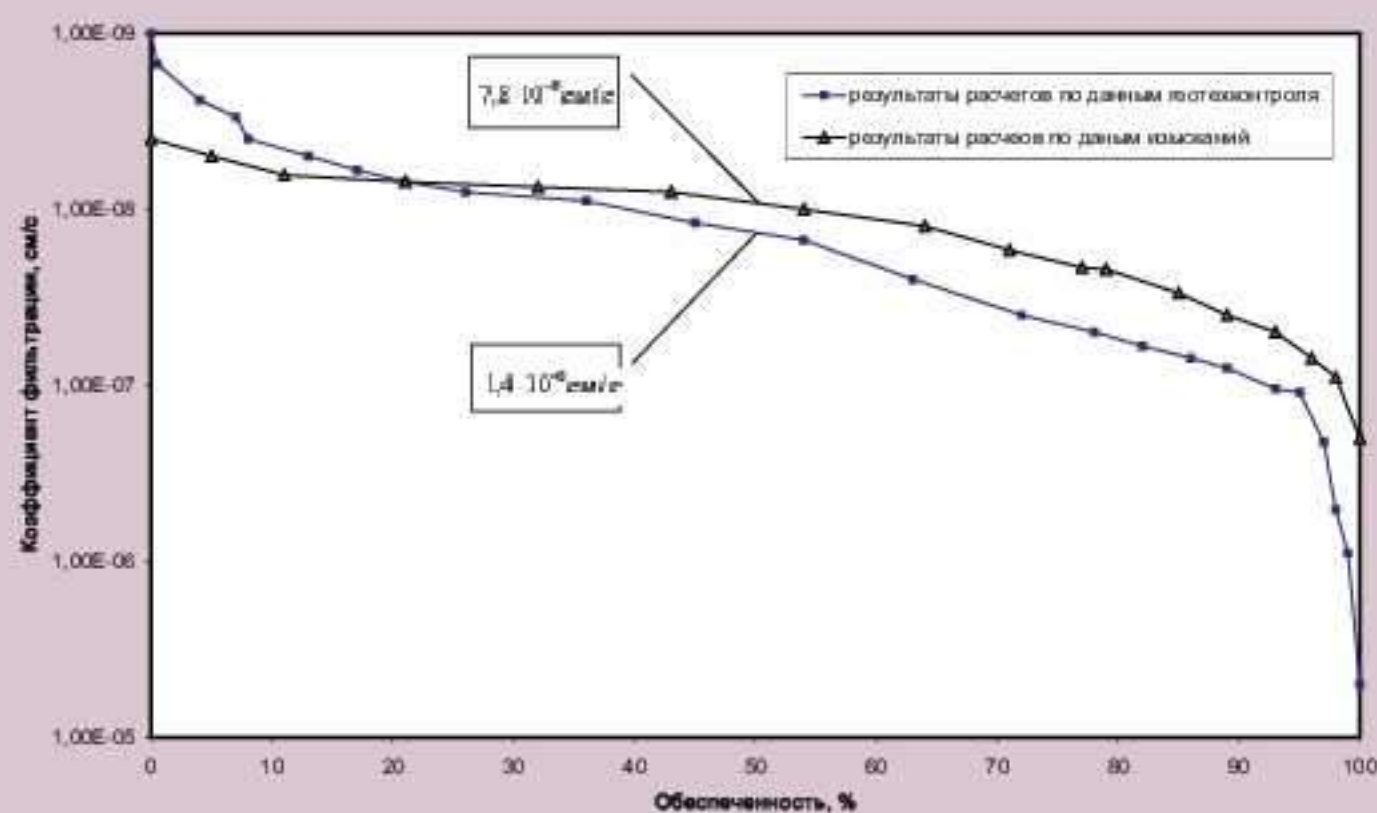


Рис. 5 Прогнозируемые графики обеспеченности коэффициента фильтрации грунтов в горизонтальной части экрана верхнего бассейна Днестровской ГАЭС

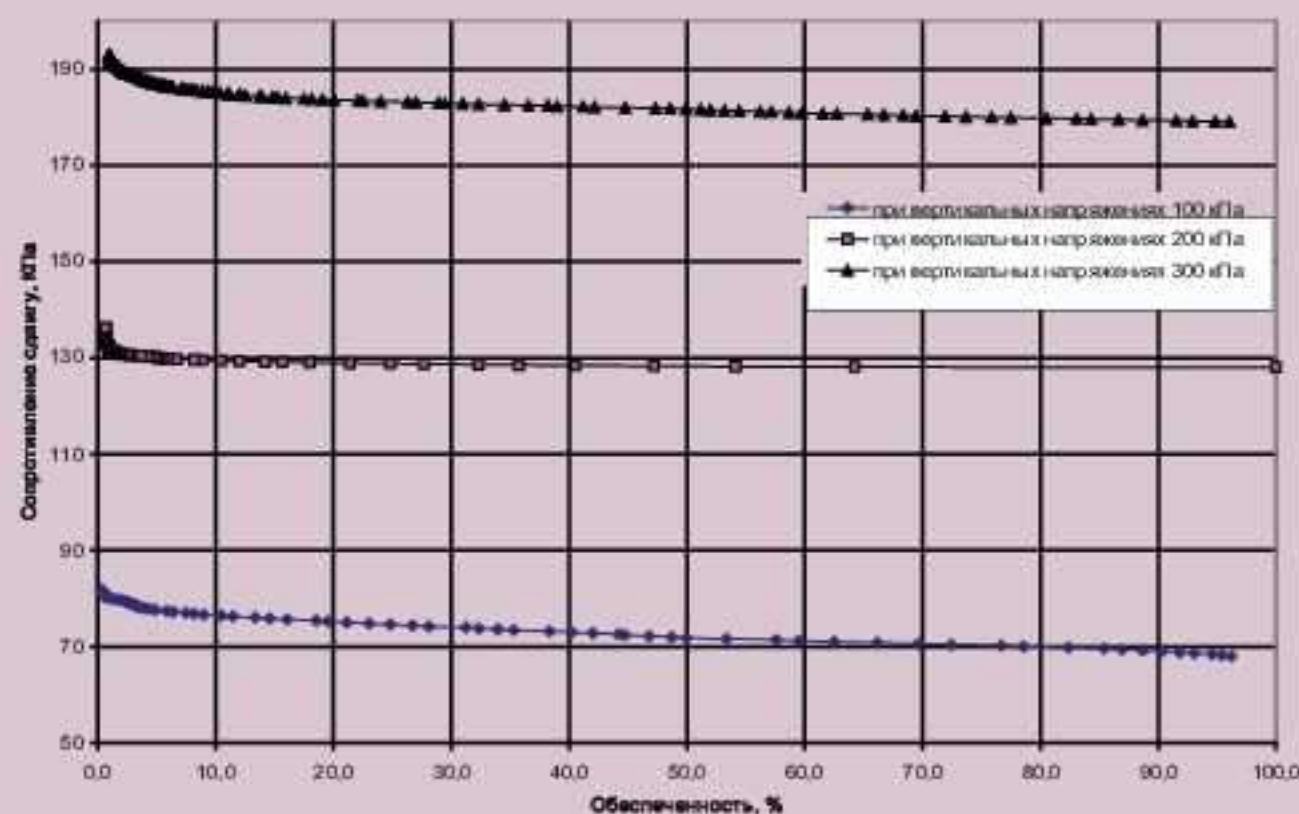


Рис. 6 Графики обеспеченности сопротивления сдвигу при одноплоскостном срезе для сутлинок карьера Волошково