

ИСПЫТАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Г.Г.Болдырев

(Пензенский государственный архитектурно-строительный университет)

1. Состояние вопроса

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений совместно с грунтовыми основаниями в последнее время все более и более выполняется с использованием численных методов в частности метода конечных элементов. МКЭ является основой многих коммерческих программ, которые применяются сегодня при расчете прочности конструкций. Большинство из этих программ были разработаны для расчета прочности в области машиностроения и не учитывают, как правило, особенностей деформирования строительных материалов, в особенности таких как грунты или бетон.

В связи с этим все известные программы расчета можно разделить на две группы. Первая группа это программы, разработанные для решения задач прочности конструкций в области машиностроения и вторая группа – программы для решения задач в области геотехники и строительства.

На сайте: <http://www.engr.usask.ca> размещен список наиболее популярных программ, как первой, так и второй группы, а на сайтах: <http://geotech.civen.okstate.edu>; <http://www.ggsd.com> приведены списки программ для решения задач в области геотехники.

Наиболее известными программами первой группы являются: ABAQUS, ADINA, ANSYS/LS-DYNA, DYNA3D, LIRA, NASTRAN и др.

В области геотехники наиболее часто используются следующие программы: ANSYS CivilFEM, GEO-SLOPE, PLAXIS, SAGE CRISP, Z_SOIL, и др.

Все перечисленные и многие другие программы расчета включают физические уравнения или модели материала, которые и определяют поведение конструкции в процессе ее нагружения. В частности, программы ANSYS и LS-DYNA содержат в настоящее время около 200 типов моделей материалов. Эти модели содержат параметры или константы, которые необходимо ввести в программу при выборе того или иного типа материала. В зависимости от типа модели материала количество вводимых параметров изменяется от трех (номер 1. Elastic, пакет ANSYS) при упругом поведении материала до 18 (номер 26. Crushable Foam) при неупругом поведении материала.

Во всех программах при описании модели материала приводятся вводимые параметры/константы, в тоже время ничего не говорится о методах их определения (кроме ABAQUS, CRISP), подразумевая, что конструктор должен знать, как это делать и откуда их взять. Однако в большинстве случаев, за исключением упругих моделей материалов, процесс определения

параметров моделей является сложным и неоднозначным. Это объясняется следующими основными причинами.

1. Неизвестна методика испытания материала и определения параметров, поэтому приходится обращаться к оригинальным публикациям авторов, исследования которых явились основой для данной модели материала. Как правило, это работы 1960 – 1990 гг. и найти ту или иную статью достаточно сложно.

2. Необходимо выполнить испытания материала, используя для этого соответствующие устройства/приборы и известную или вновь разработанную методику испытаний.

3. Полученные параметры моделей материалов необходимо калибровать методами оптимизации путем моделирования процесса испытания и численного расчета для различных условий нагружения.

Первое замечание вполне разрешимо, следует только проявить настойчивость. Вторая и третья причины связаны неразрывно и решить их значительно сложнее, в большинстве случаев из-за отсутствия соответствующего оборудования и методик для испытаний образцов материалов и идентификации параметров.

Несмотря на это известны вполне успешные попытки решить данную проблему путем использования автоматизированных систем испытания материалов с последующей минимизацией ошибки между наблюдаемым в опытах поведением материалов и их численной реализацией методом конечных элементов. Работа в подобной постановке выполняется более 30 лет Northwest Numerics and Modelling, Inc. (www.nwnumerics.com), которая разработала набор программ серии Z для создания определяющих уравнений полимерных и композитных материалов /1/. Сущность метода заключается в экспериментальном определении функции диссипации плотности энергии. Это достигается посредством использования схемы нелинейной оптимизации для определения свободных коэффициентов данной функции, основываясь на балансе энергии образца материала при испытании. Испытания материалов проводятся на специально сконструированном стенде, который позволяет нагружать образцы по различным траекториям. Разработанные аналитические и численные решения позволяют получить нелинейные определяющие уравнения из имеющихся экспериментальных данных, которые затем интегрируются автоматическим способом с программами ANSYS или ABAQUS. Это достигается автоматической генерацией кода подпрограммы «USERMAT в ANSYS», которая может быть в последующем использована с любой геометрией и условиями нагружения, определяемыми возможностями библиотеки конечных элементов ANSYS. Для автоматической генерации кода подпрограммы «USERMAT» разработан набор программных модулей Z-mat, ZebFront, Z-sim.

В конечно элементных кодах определяющие уравнения используются на каждой точке интегрирования для описания поведения материала. Z-mat обладает способностью создавать более совершенные определяющие уравнения основываясь на строгих формулировках переменных

термодинамического состояния. Фактически Z-mat является динамической библиотекой, которая расширяет возможности программ ANSYS и ABAQUS и дает более гибкий объектно ориентированный интерфейс для разработки пользователем своих моделей материалов (определяющих уравнений). Библиотека содержит многие модели материалов позволяя пользователю объединять различные элементы моделей для конструирования новой модели различных материалов таких как металлы, полимеры, кристаллы, грунты, скальные породы, анизотропные материалы и др. Пользователь строит новую модель просто делая соответствующую запись в спецификации материала в Z-mat вводном файле в выражениях существующих комбинаций: закона течения, условия прочности и закона упрочнения. Для примера, пластичность – вязкопластичность не заданы явно в виде какой-то модели, а конструируются в водном файле пользователем, определяя компоненты деформации, зависящие или независящие от времени.

2. Автоматизированная система для испытания материалов

В отличие от рассмотренной технологии мы предлагаем на начальном этапе решить задачу определения параметров моделей грунтов, скальных пород и бетонов используя результаты испытаний с применением измерительно-дычислительного комплекса (ИВК АСИС). ИВК АСИС сертифицирован Госстандартом РФ как средство измерения и включен в реестр промышленной продукции. Блок схема ИВК АСИС показана на рис. 1. Объектом измерения ИВК АСИС являются деформации и напряжения, возникающие при нагружении образцов материалов, в приборах различной конструкции, вплоть до разрушения. Реализуемые схемы нагружения образцов материала показаны на рис. 2: а) истинное трехосное сжатие; б – осесимметричная деформация (сжатие); в – осесимметричная деформация (расширение); г) чистый сдвиг; д) одноосное сжатие; е) плоская деформация; ж) прямой срез; з) одноосное растяжение; к – компрессионное сжатие с измерением боковых напряжений; л – компрессионное сжатие; м - растяжение в условиях сложного напряженного состояния; н – растяжение с надрезом; о – изгиб с надрезом; п – полые цилиндрические образцы.

Приборы и определяемые в них параметры для ряда моделей материалов приведены в табл. 1, 2. В связи с ограничением объема публикации в таб. 1 не приведены параметры моделей «Сар, Cam-Clay, модифицированной Cam-Clay» и др.

При определении параметров перечисленных в табл. 1 используются различные функциональные зависимости между напряжениями и деформациями, часть из которых показана на рис. 3 - 5. Получены с использованием программы ASIS Report.

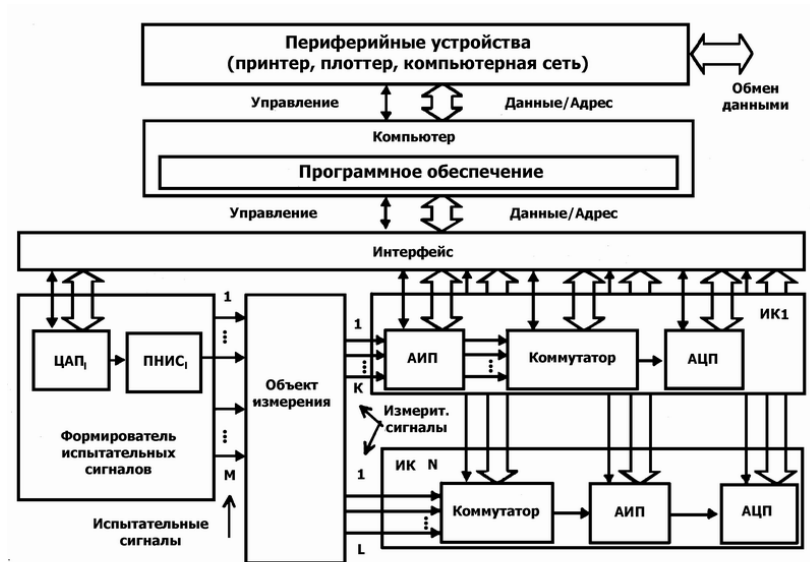


Рис.1. Измерительно-вычислительный комплекс

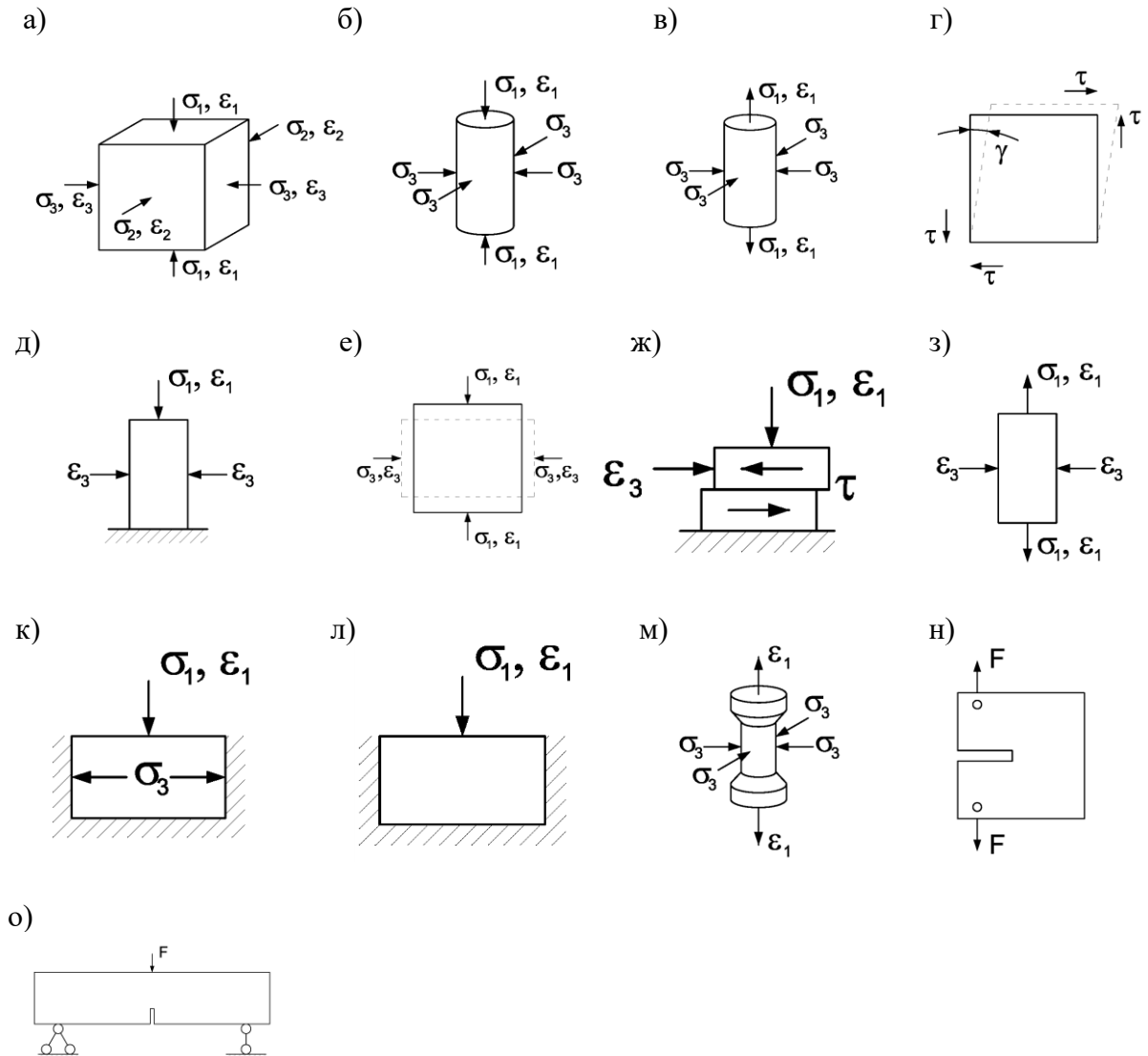


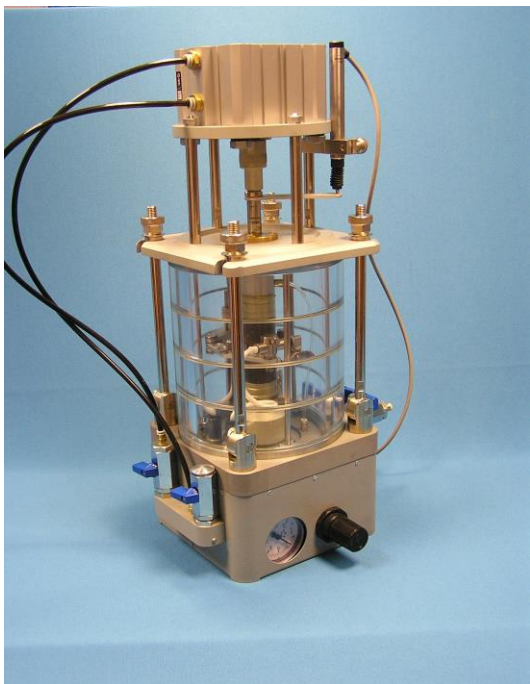
Рис. 2. Схемы нагружения материала

Табл. 1. Параметры грунта и бетона определяемые из испытаний

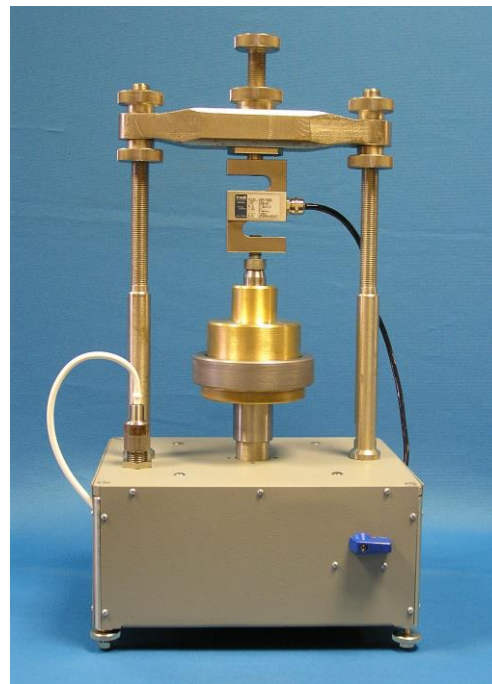
Наименование прибора	Наименование параметров													
	ν	E	G	K	φ	c	ψ	R	ξ	K_i	W_i	R_{bif}	R_{bt}	R_t
Истинного трехосного сжатия	+	+	+	+	+	+	+	-	-					
Осесимметричного сжатия/расширения (ГОСТ 12248-96)	+	+	+	+	+	+	+		+					
Компрессионное сжатие (ГОСТ 12248-96)		+							+					
Прямой срез (ГОСТ 12248-96)					+	+								
Чистый сдвиг			+											
Одноосное сжатие (ГОСТ 12248-96)	+	+												+
Одноосное растяжение	+	+						+						
Изгиб балки с надрезом (ГОСТ 29167-91)		+								+	+	+	+	

ν - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости/деформации; G - модуль сдвига; K - модуль объемной деформации; φ - угол внутреннего трения; c - силы сцепления; ψ - угол дилатанции; R - прочность на одноосное сжатие; ξ - коэффициент бокового давления; W_i - энергозатраты при упругом деформировании; K_i - коэффициенты интенсивности напряжений; R_{bif} - прочность на растяжение при изгибе; R_{bt} - прочность на осевое растяжение бетона; R_t - прочность на одноосное растяжение; R - прочность на одноосное сжатие

Табл. 2. Основные типы приборов, входящие в состав ИВК АСИС



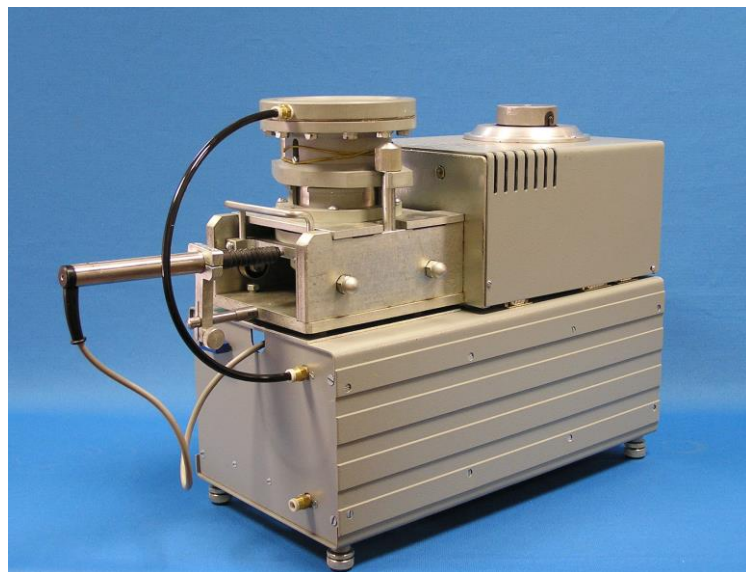
Прибор трехосного сжатия



Компрессионный прибор



Компрессионный прибор с измерением боковых напряжений



Прибор прямого среза с кинематическим нагружением

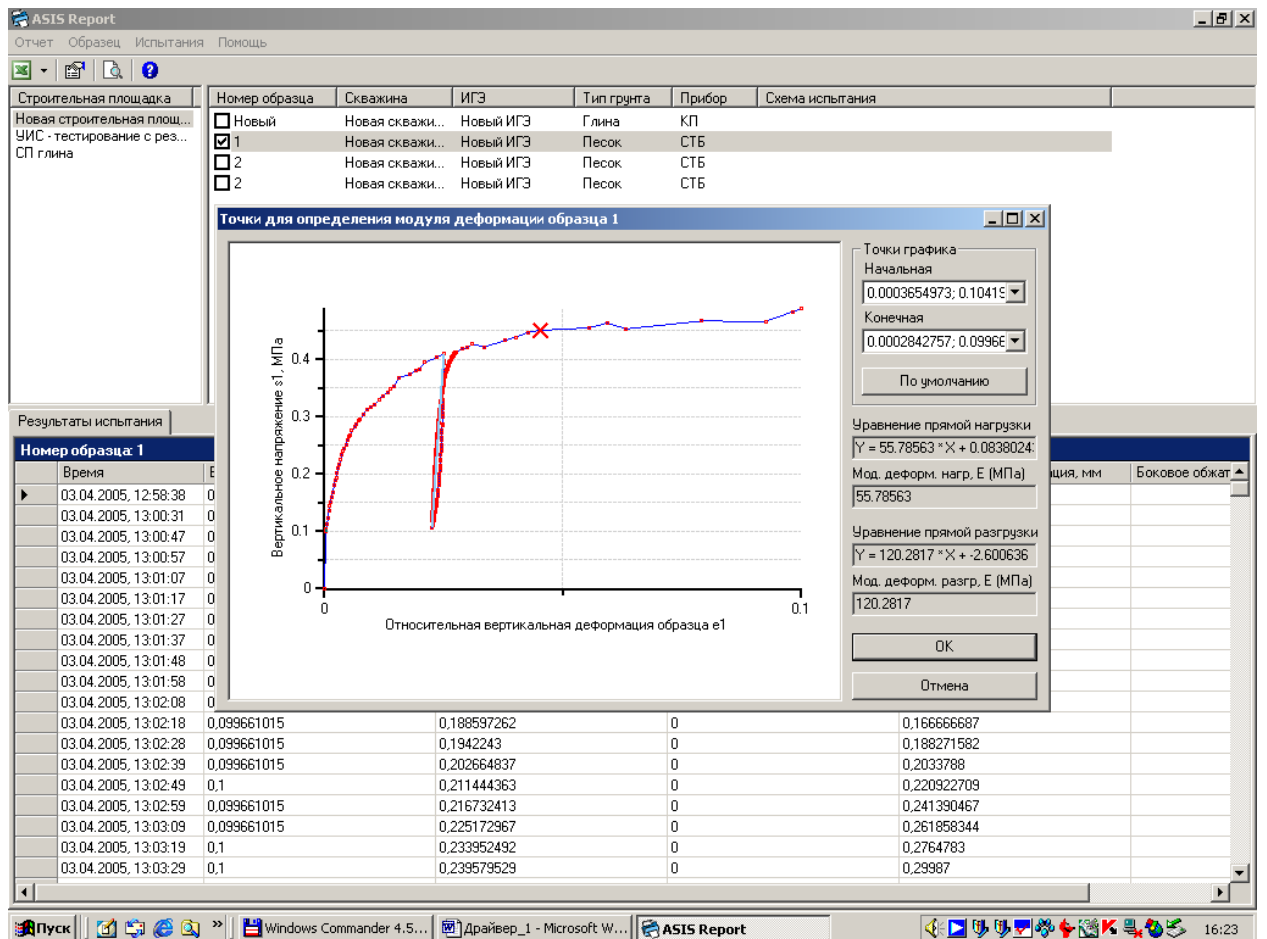


Рис. 3. Зависимость осевой деформации ε_1 от осевого напряжения σ_1 при всестороннем давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ кПа: модуль деформации при нагружении $E = 55,78$ МПа; упругий модуль деформации (при разгрузке) $E = 120,28$ МПа; предельная нагрузка $\sigma_1 = 0,45$ МПа (крестик на графике)

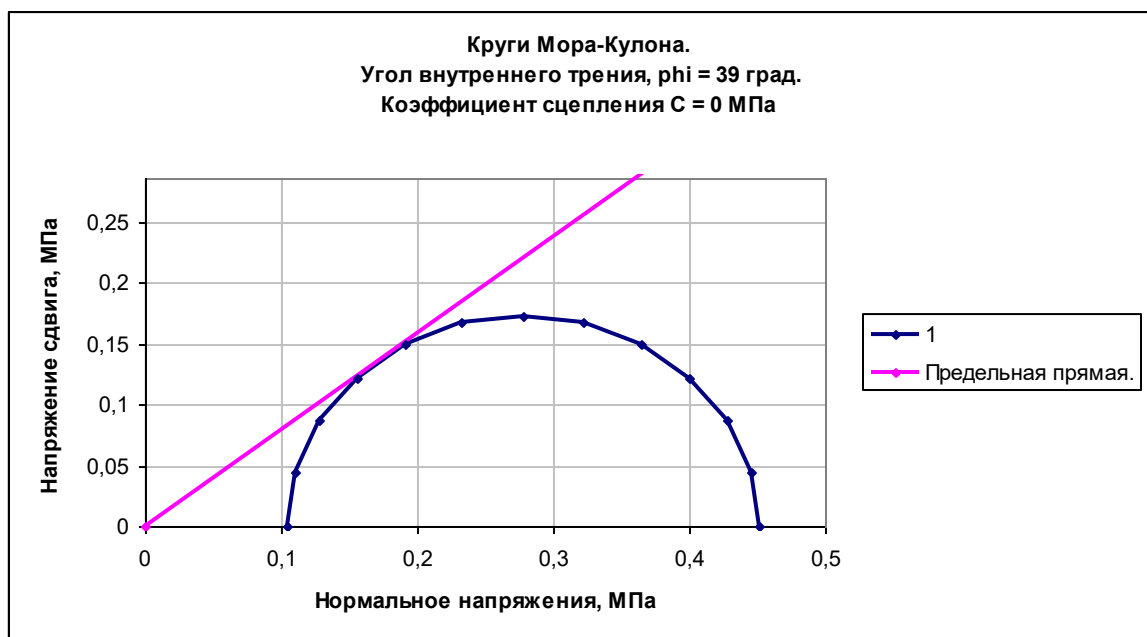


Рис. 4. Параметр прочности, ϕ , для сыпучего материала

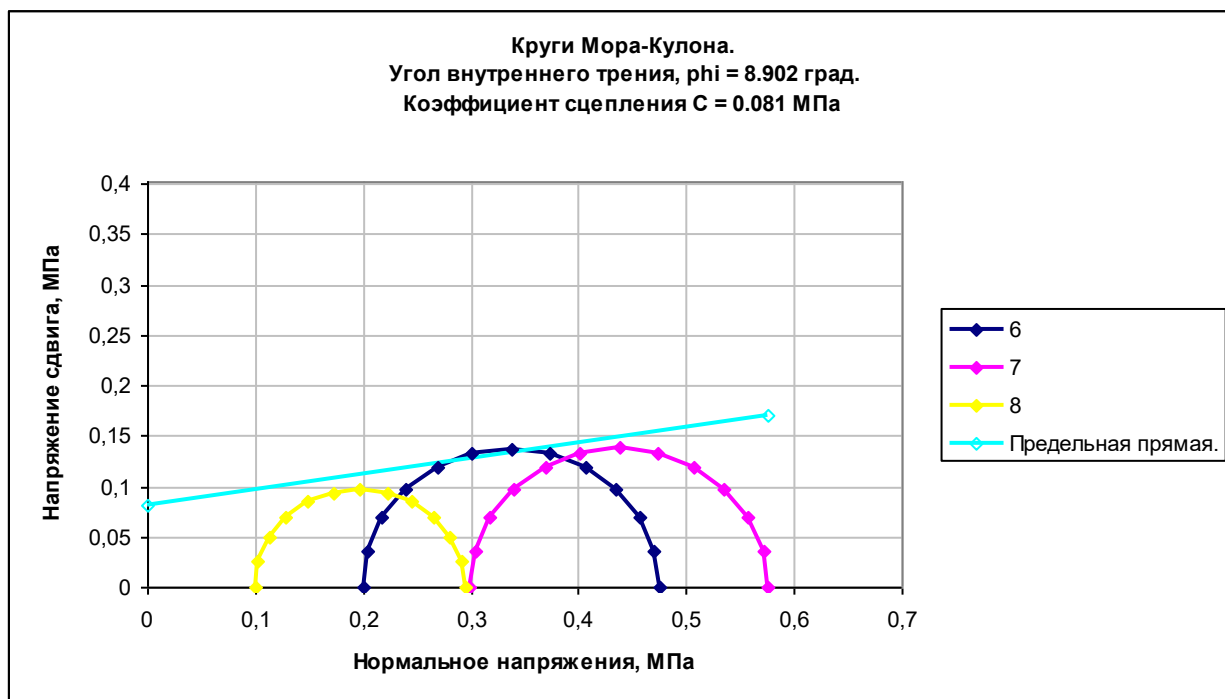


Рис. 5. Параметры прочности φ и c для связного материала

Результаты испытаний хранятся в базе данных для каждого вида испытаний и используются в процессе калибровки/идентификации параметров методом оптимизации.

3. Оптимизация параметров моделей

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом /2/. Найти такой набор параметров x , чтобы скалярная целевая функция $f(x)$ была минимальной. Наиболее часто при калибровке параметров моделей материалов используется метод наименьших квадратов /1, 3, 4/, сущность которого заключается в минимизации суммы квадратов разницы между предсказанием математической модели и наблюдениями:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i [f(x, t_i) - y(t_i)]^2, \quad (1)$$

где $f(x, t_i)$ - значения модели; $y(t_i)$ - соответствующее опытное значение; n - общее количество точек измерений в опыте; t_i - признак опыта (например, номер опыта); ω_i - весовые коэффициенты, связанные с опытной точкой i .

Минимизируя $f(x)$ изменяя x в интервале $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$, таким образом, чтобы было выполнено условие

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, n_g \quad (2)$$

находят наилучший набор параметров x^* модели близкие к опытным данным. Здесь g - вектор ограничений используемый чтобы ограничить или связать данные опытов с расчетными значениями.

Из результатов испытаний мы имеем данные измерений напряжений и деформаций в виде функций, параметры которых являются предметом идентификации (рис. 3):

$$\sigma_{ij}^* = f(\varepsilon_{ij}^*; k^*), \quad (3)$$

где $\sigma_{ij}^*, \varepsilon_{ij}^*$ - напряжения и деформации, соответственно, а k^* - идентифицируемые параметры модели материала. Поэтому выражение (1) можно записать в виде:

$$\min \sum_{i=1}^n [\omega_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)]^2,$$

где σ_{ij} - напряжения, вычисляемые с использованием модели материала.

Целевая функция $F(x)$ зависит от измеренных и расчетных данных и может быть очень сложной и содержать ошибки, обусловленные как моделью материала, так и результатами измерений при испытании материала. В подобных случаях решение может расходиться или сходиться медленно, поэтому следует выбирать метод оптимизации дающий устойчивую сходимость исходя из требуемой точности и эффективности.

В локальном методе оптимизации точность решения определяется выражением

$$F(x^*) < F(x)$$

при условии, чтобы $\|x - x^*\| < \varepsilon$.

В нашей работе мы используем подпрограмму нелинейной оптимизации Isqpolin пакета Matlab. В данной подпрограмме реализован метод Левенберга – Марквардта с выбором размера шага и направления поиска для каждой итерации.

Блок схема идентификации параметров модели материала показана на рис. 6. Полученные параметры предлагаются пользователю к использованию при вводе в программы расчета конструкций или оснований.

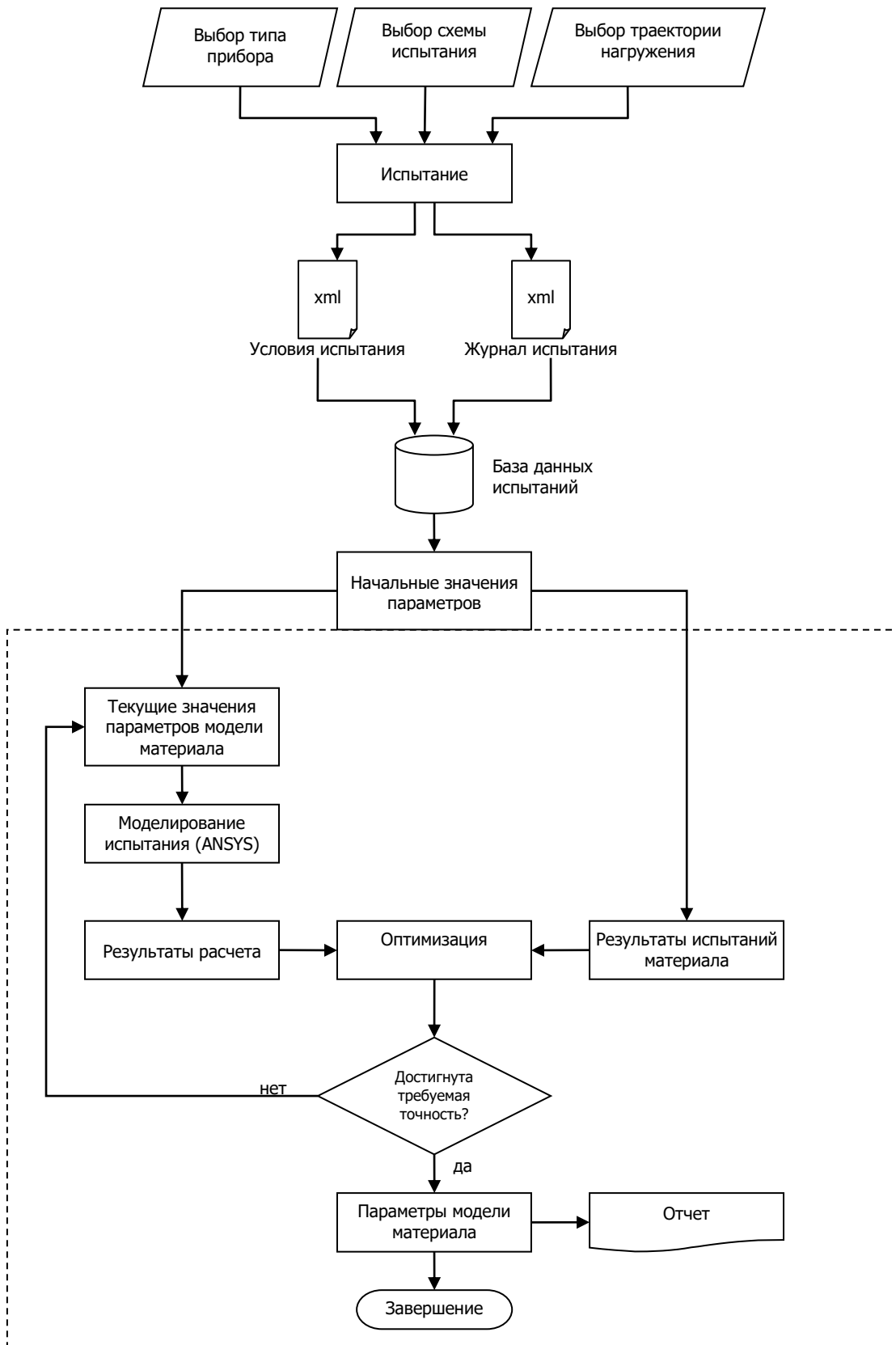


Рис. 6. Блок схема испытаний материала и идентификации параметров модели материала

Литература

1. Michopoulos J.G. Program syntesis of FEA constitutive behavior modules through data driven design optimization. *Proced. Of DETC`02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Montreal, Canada, 2002.
2. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. www.matlab.ru/optomz/index.asp.
3. Yang Z., Elgamal A. Application of unconstrained optimization and sensitivity analysis to calibration of a soil constitutive model. *Int.J.Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2003, vol. 27, pp. 1277-197.
4. Furukawa T., Sugata T., Yoshimura S., Hoffman M. An automated system for simulation and parameter identification of inelastic constitutive models. *Int.J.Comut. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 1999.