

ГОРНОЕ ДЕЛО

МРНТИ 52.01.77

М.Т. Билецкий², Б.Т. Ратов¹, С.К. Муратова¹, А.Р. Байбоз²

¹Каспийский общественный университет, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ

Аннотация. Преимущества компьютерных методов – в быстродействии, и точности вычислений, возможности проведения большого числа виртуальных опытов, а также возможности использования методов вычислительной математики. Цель работы – компьютерный анализ теорий разрушения пород при бурении, и внесение изменений и дополнений, представляющих собой существенную новизну. Обнаружена ошибка в известном алгоритме расчета внедрения резца в горную породу и объяснена ее причина. Известная теория бурения-резания проиллюстрирована примерами; некоторые результаты уточнены методом итераций. Составлена программа применения распределения Стьюдента при статистической обработке опытов и, в частности, – для установления их необходимого числа. Обычная процедура уточнена методом итераций. Приведены структуры соответствующих программ. Изложенное, может использоваться при создании новых типов долот, а также при оптимизации технологии бурения.

Ключевые слова: пользовательские программы, совершенствование результатов исследований, теории разрушения пород при бурении, внедрение резца, бурение-резание, статистическая обработка опытов.

• • •

Түйіндеме. Компьютерлік әдістердің артықшылығы – есептеулерді жылдам әрі дәл есептеу, виртуалды сынақтарды кеп мелшерде жүргізу мүмкіндігі, сонымен қатар есептеу математикасы әдістерін қолдану мүмкіндіктері. Жұмыстың мақсаты – бұрғылау кезінде тау жыныстарының талқандалу теориясының компьютерлік талдауы және айтарлықтай жаңалық болып саналатын өзгерістер мен қосымшаларды енгізу. Кескіштің тау жынысына енуінің белгілі алгоритмінде қателіктер анықталды және оның себебі түсіндірілді. Белгілі

бұрғылау-кесу теориясы мысалдармен кернекіленді; кейбір нәтижелер итерация әдісімен нақтыланды. Сынақтарды статистикалық еңдеу кезінде, оның ішінде олардың қажетті санын анықтау үшін Стюдент таралымын қолдану бағдарламасы жасалды. Қарапайым процедура итерация әдісімен нақтыланды. Сәйкес бағдарламалардың құрылымы керсетілген. Айтылған мәліметтерді қашаулардың жаңа типтерін жасағанда, сонымен қатар бұрғылау технологиясын оңтайландыру кезінде қолдануға болады.

Түйінді сөздер: пайдаланушы бағдарламалар, зерттеу нәтижелерін жетілдіру, бұрғылау кезінде жыныстарды талқандау теориясы, кескіштердің енгізілуі, бұрғылау-кесу, сынақтарды статистикалық еңдеу.

• • •

Abstract. The advantages of computer programs are high-speed performance, accuracy, possibility to perform great number of virtual experiments, and applicability of numerical mathematics methods. The objective of the work is an analysis of rock destruction while drilling theories and entering alterations and amendments, representing an essential novelty. An error in the currently in use algorithm of the indenter penetration in the rock discovered, and its explanation presented. The cutting type drilling theory is illustrated by examples, some of its outputs are specified by iteration method. A program for the Student distribution at statistic processing of experiments is made up and in particular for determining their necessary quantity. The currently in use procedure is specified by use of the iteration method. The above stated can be applied at designing new type bits, as well at optimization of drilling technology.

Keywords: user program, research outputs amendment, rock destruction at drilling theories, indenter penetration, cutting type drilling, statistic processing of experiments.

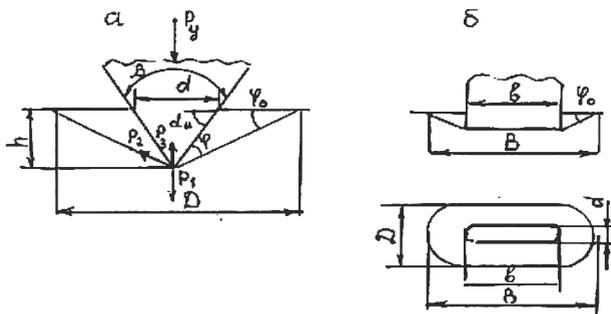
Введение. Проверка адекватности теоретических моделей, в частности того, насколько верно они отражают физические закономерности и в какой степени пригодны для решения практических проблем, производится путем лабораторных экспериментов. Последние требуют существенных затрат: наличия стендов, измерительных приборов, самописцев, а также материального объекта над которым производятся опыты (в случае изучения процесса бурения, это блоки разбуриваемых пород). Поэтому первоначально проверку теоретических моделей, осуществляют расчетным путем с помощью примеров, условия которых отражают типичные ситуации. Результат оценивают опираясь на литературные данные и практический опыт.

Теоретические модели [1] нередко сложны и расчеты могут требовать больших затрат времени. Проблема решается с помощью пользовательских компьютерных программ и компьютерных моделей. Их преимущества:

- Быстрота: затраты времени близки к нулю; виртуальные опыты могут производиться в количестве, недостижимом для ручных вычислений;
- Ошибки вычислений можно снизить до любого желательного уровня;
- Возможность получения любых зависимостей, наиболее интересные из которых избираются для подтверждения на лабораторных экспериментах;
- Возможность установления предельных условий и, в частности, таких которые неприемлемы для лабораторных экспериментов по условиям безопасности, прочности, высокой стоимости и т. п.;
- В ряде случаев пользовательская программа становится не только переводом математической модели на язык компьютера, но и частью самой этой модели. Например, когда сложные для традиционной математики проблемы, легко разрешаются методами вычислительной математики.

Ниже рассмотрены примеры применения компьютерных методов для исследования моделей разрушения горных пород при бурении скважин.

Методы исследования. Большой интерес представляет собой процесс внедрения резца (индентора) в поверхность горной породы. На рисунке 1 представлено внедрение индентора клиновидного типа, получившего в буровых породоразрушающих инструментах наибольшее распространение [2].



β – угол приострения; φ_0 – угол между линией скола и поверхностью

Рисунок 1 - Работа клиновидного индентора

φ – угол между линией скола и гранью клина; α_n – угол между гранью клина и поверхностью; h – глубина внедрения; B – длина лунки скола; D – ее ширина; d – ширина внедрившейся части клина, на уровне поверхности; b – длина резца; P_y – вертикальная нагрузка; P_1 – сила, обеспечивающая внедрение; P_2 – сила внутреннего трения; P_3 – равнодействующая сил трения.

В соответствии с этой схемой И.А. Остроушко вывел формулу зависимости нагрузки P_y от ширины d , с учетом углов β , и φ_0 , а также механических характеристик породы: предела прочности на скалывание σ_0 , коэффициентов Пуассона μ , внутреннего трения f

$$P_y = \frac{(0.785d^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_n \cos \varphi_0 + d \operatorname{tg} \alpha_n \sin \varphi_0 (b-d)) \sigma_0}{1 - \mu \sin^2 \varphi_0 (\cos \varphi_0 - f \sin \varphi_0)}, \quad (1)$$

Эта формула была нами видоизменена с учетом того что:

$$\alpha_n = 90^\circ - 0.5\beta \quad (2)$$

$$d = 2h \operatorname{tg}(0.5\beta) \quad (3)$$

$$P_y = \frac{(0.785(2h \operatorname{tg}(0.5\beta))^2 \operatorname{tg}^2(90^\circ - 0.5\beta) \cos \varphi_0 + 2h \operatorname{tg}(0.5\beta) \operatorname{tg}(90^\circ - 0.5\beta) \sin \varphi_0 (b - 2h \operatorname{tg}(0.5\beta))) \sigma_0}{1 - \mu \sin^2 \varphi_0 (\cos \varphi_0 - f \sin \varphi_0)} \quad (4)$$

Формулы (1) и (4) позволяют определить вертикальную нагрузку P_y в зависимости от ширины внедрившейся части d или внедрения h соответственно. Более практичной представляется обратная задача, а именно определение внедрения в зависимости от нагрузки. Задание того или иного значения нагрузки зависит только от воли оператора, тогда как задание внедрения, затруднительно, т. к. оно зависит от неуправляемых факторов, связанных со свойствами породы. Решение обратной задачи было осуществлено следующим образом:

В уравнении (4) внедрение h встречается во второй и первой степенях, поэтому было использовано каноническое квадратное уравнение:

$$Ah^2 + Zh + C = 0, \quad (5)$$

решение которого имеет вид:

$$h = -\frac{Z}{2A} \pm \sqrt{\left(\frac{Z}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}, \quad (6)$$

Коэффициенты при h^2 , h и свободный член в формуле (5) равны:

$$\begin{aligned}
 A &= \sigma_0 (\pi g^2 (0.5\beta) t g^2 (90^\circ - 0.5\beta) \cos \varphi_0 - 4 t g^2 (0.5\beta) t g (90^\circ - 0.5\beta) \sin \varphi_0) \\
 Z &= \sigma_0 (2 t g (0.5\beta) t g (90^\circ - 0.5\beta) \sin \varphi_0 b) \\
 C &= -P_y \frac{\mu}{1-\mu} \sin^2 \varphi_0 (\cos \varphi_0 - f \sin \varphi_0)
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

Была составлена компьютерная программа, в которой после введения исходных данных располагались расчеты по формулам (7) и (6) с последующим выводением результатов на печать. Программа позволила обсчитать различные варианты, относящиеся к типичным условиям бурения. При варьировании каждым исследуемым параметром, остальные параметры поддерживались у одних и тех же значений, относящихся примерно к середине их обычно используемого диапазона. Величина угла между плоскостью забоя и линией скола согласно данным проведенных исследований [3,4] принята постоянной и равной $\varphi_0=30^\circ$. Обратила на себя внимание зависимость представленная в таблице 1.

Таблица 1- Зависимость внедрения h клинового индентора от угла приострения β ($P_y = 3\text{кН}$, $b= 0.01\text{м}$, $\sigma_0=16\text{ МПа}$, $\mu=0.3$, $f=0.6$, $\varphi_0=30^\circ$)

β , град	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
h , мм	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	1.00	1.03	1.06	1.10	73
d , мм	0.33	0.50	0.70	0.91	1.13	1.40	1.73	2.12	2.62	210

Бросается в глаза огромный скачок значений h и d , в последней колонке таблицы. И. А. Остроушко отмечал, что формулой (1) нельзя пользоваться при $\beta > 180^\circ - 2\varphi_0$

В данном варианте эта граница должна была бы быть $180 - 2 \cdot 30 = 120^\circ$, но согласно уточненным расчетам она оказалась равна 107.3° .

В то же время таблица демонстрирует серьезное расхождение полученных результатов с ожидаемыми. Так, с ростом угла приострения β (то есть при более тупом клине) внедрение h не только не уменьшается, но даже несколько возрастает, что явно противоречит физическим закономерностям. Это хорошо видно по возрастанию ширины внедрившейся части d , которая с ростом угла от 20 до 100° возросла в 7.9 раз. Тупой резец внедряется лучше, чем острый!

Представляется, что ошибка рассматриваемого алгоритма заключается в следующем: было заявлено [2], что наибольшее значение нагрузки P_y возникает в момент раздавливания, когда сила P_y расходуется на про-

цесс скалывания и выбрасывания фрагментов породы, расположенной между гранью резца и поверхностью скола, определяемой углом φ_0 . Ввиду постоянства [3] угла φ_0 , это поверхность также постоянна и не зависит от угла приострения клина β , что и демонстрируют данные таблицы 1.

По нашему мнению, наибольшее значение P_y возникает не в самый момент скола, но в момент ему предшествующий, когда согласно Л.А. Шрейнеру [4] индентор в условиях всестороннего сжатия внедряется и достигает критической глубины h , при которой и возникает система трещин с последующим сколом. Для такой модели наибольшая глубина внедрения несомненно зависит от остроты угла клина β .

Таким образом, использование компьютерной программы позволило выявить неадекватность принятой модели внедрения.

Для широко распространенного случая бурения-резания, когда породоразрушающий инструмент (ПРИ) углубляется по спирали, снимаемая постоянный по толщине (при постоянстве условий) слой породы.

В.С. Владиславлев [5] определяет тангенс угла наклона спирали к забою как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2q}{a\delta}, \quad (8)$$

где δ – ширина конца индентора, в направлении его движения; q – интенсивность вертикальной нагрузки; a – жесткость пары индентор – порода. Согласно работе [4] принято:

$$a = \frac{E}{1-\mu^2}, \quad (9)$$

где E и μ – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона породы.

С учетом условий работы ПРИ в бурящейся скважине:

$$q = \frac{Q}{mb}, \quad (10)$$

где Q – осевая нагрузка на ПРИ; m – число резцов, перекрывающих ширину забоя; b – ширина забоя (по радиусу).

Исходя из формул (8) – (10), нами была получена удобная для практического применения формула углубки на один оборот ПРИ:

$$y_{об} := x_{об} \frac{2Q(1-\mu^2)}{bmE\delta\lambda}, \quad (11)$$

где $x_{об}$ – длина окружности вращения резца, приведенная к середине его ширины; λ – коэффициент, учитывающий стесненные условия работы резцов в скважине. Принимается $\lambda = 1.38$ [5]

Механическая скорость бурения:

$$V_M = y_{OB} n, \quad (12)$$

где n – частота вращения ПРИ

Была составлена компьютерная модель с участием формул (11) и (12). Результаты виртуальных опытов по нахождению одной из зависимостей, для типичных условий даны в таблице 2

Таблица 2 - Зависимость Y_{OB} и V_M бурения коронкой от ширины резца b (его притупления). $E = 50000$ МПа, $\mu = 0.3$, $m = 4$, $b=9$ мм, $X_{OB}=324$ мм, (коронка112мм), $Q = 10000$ Н, $n = 100$ об/мин.

Притупление резца δ , мм	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2
Углубка за оборот y_{OB} , мм	1.49	1.71	1.99	2.38	2.98	3.96	5.96	11.9
Скорость бурения V_M , м/ч	8.96	10.2	11.9	14.3	17.9	23.8	35.8	71.4

Можно видеть, что зависимость углубки на оборот от ширины площадки притупления выражена весьма сильно. Однако рассмотренный алгоритм не учитывает важный влияющий фактор, на который указал автор теории В.С. Владиславлев:

При движении резца по забою он, преодолевая сопротивление породы, воздействует передней гранью на стенку своей канавки с силой:

$$P = \sigma_{сд} b H, \quad (13)$$

где $\sigma_{сд}$ – предел прочности породы на сдвиг, b - ширина канавки, H – ее глубина.

$$H = Y_{OB} / m, \quad (14)$$

На передней грани резца сила P вызывает силу трения, направленную вверх, противодействуя вертикальной нагрузке Q :

$$\tau = P f, \quad (15)$$

где f – коэффициент трения резец-порода.

Таким образом истинное значение осевой нагрузки:

$$Q_H = Q - \tau \quad (16)$$

Для нахождения по этой формуле Q_H и затем по нему с помощью формулы (11) соответствующего истинного значения углубки за оборот y_{OB} , необходимо уже знать это, еще неизвестное, истинное значение y_{OB} , чтобы по нему найти H (формула (14)) и подставить его в формулу (13) – что представляет собой “порочный круг” и выглядит недопустимым.

Однако эту задачу можно решить приближенно, с любой потребной точностью – путем применения метода итераций (вычислительная математика [6]). Он сводится к ряду повторных вычислений:

а) С целью нахождения $y_{об}$ в формулу (11) подставляется номинальное значение нагрузки Q_1 , найденное без учета сил трения т. Очевидно, что оно будет завышенным ($Q_1 > Q_{и1}$). Рассчитанные по нему, значения $y_{об1}$, H_1 , а также сил P_1 и τ_1 окажутся также завышенными. Отсюда вытекает, что рассчитанное с помощью формулы (16) уточненное значение Q_2 окажется заниженным ($Q_2 < Q_{и1}$).

б) В формулу (11) подставляется уточненное значение нагрузки Q_2 . Тогда $y_{об2}$, H_2 , P_2 и τ_2 будут также занижены, а Q_3 – завышенным ($Q_3 > Q_{и1}$). Отметим, что при этом окажется, что $Q_3 < Q_1$. т. е. Q_3 будет ближе к $Q_{и1}$.

Повторяя процедуру по п. п. а и б, мы будем получать чередование завышенных и заниженных значений, все ближе сходящихся к $Q_{и1}$.

При каждой i - той итерации погрешность нахождения $Q_{и}$ оказывается в пределах

$$\Delta_i = ABC(Q_i - Q_{i-1}) \quad (17)$$

Приближение к $Q_{и1}$ будет считаться достаточным если:

$$\Delta_i < e, \quad (18)$$

где e – допустимое в рассматриваемых условиях значение погрешности.

Для осуществления метода итераций составлена программа, состоящая из следующих разделов;

1) Ввод: характеристик породы: E , μ , $\sigma_{сд}$, f ; характеристик ПРИ: $X_{об}$, m , δ , b ; характеристик режима бурения n , Q , и допустимой ошибки e

2) Программный цикл, включающий:

– Заголовок: Параметр цикла i изменяется от 1 до некоторого заведомо достаточного значения;

– Вычисления: H_i – формулы (11) и (14); P_i – (13), τ_i – (15), Q_i – (16), Δ_i – (17);

– Проверка на удовлетворение условия (18). Если условие не удовлетворено, то итерации продолжаются, в противном случае цикл завершается;

3) Значения, вычисленные в ходе последней итерации, выводятся на печать.

Работа программы демонстрируется примером, (таблица 3). Условия работы коронки те же, что и для таблицы 2. Дополнительно принято: $f = 0.55$ [3] и $\sigma_{сд} = 48$ МПа (повышено с учетом гидростатического и горного давлений, действующих на поверхность забоя

скважины). Площадка притупления $\delta = 0.2$ мм. Допустимая ошибка нагрузки $\ell = 50$ Н.

Таблица 3 - Расчет истинного значения осевой нагрузки методом итераций

i	Q, Н	Δ	H, мм	P, Н	τ , Н
1	10000	10000	2.986	5159	2838
2	7162	2830	2.138	3695	2032
3	7968	805	2.379	4111	2261
4	7739	228	2.311	3993	2196
5	7804	65	2.330	4026	2214
6	7786	18	2.325	4017	2209

i - номер итерации; Q, - осевая нагрузка; Δ - абсолютное значение; $Q_{i+1}-Q_i$; H – глубина канавки; P – сопротивление перемещению; τ –трение.

Можно проследить, как с увеличением i, расхождения между соседними значениями всех параметров уменьшаются. При i = 6 $\Delta = 18$ Н, что меньше, $\ell = 50$ Н. Значения 6-й итерации и принимаются за истинные

С учетом изложенного, были откорректированы данные таблицы 2 (для тех же условий, что и в таблицах 2 и 3).

Таблица 4 - Зависимость нагрузки Q, углубки $Y_{об}$, сил P и τ , а также V_M от δ

Притупление δ , мм	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2
Осевая нагрузка Q, кН	9.69	9.66	9.61	9.55	9.46	9.34	9.14	8.75	7.79
Углубка $Y_{об}$, мм	1.29	1.44	1.64	1.90	2.26	2.79	3.64	5.23	9.30
Сила P, кН	0.56	0.62	0.71	0.82	0.98	1.20	1.57	2.26	4.02
Сила трения τ , кН	0.31	0.34	0.39	0.45	0.54	0.66	0.86	1.24	2.21
Скорость V_M , м/ч	7.72	8.65	9.84	11.4	13.6	16.7	21.02	31.4	55.8

Сравнение таблиц 4 и 2 демонстрирует, что влияние τ на уменьшение Q, $Y_{об}$ и V_M тем сильнее, чем острее резец. Если для резцов с $\delta = 1.60$ мм V_M снизилась всего на 3.5 % (с 8.96 до 8.66 м/ч), то при $\delta = 0.2$ мм оно составляет уже 21.8 % . – с 71.4 до 55.8 м/ч. Это вызвано тем (формула (13)) что усилие P пропорционально шагу H который растет с уменьшением δ .

Для статистических оценок результатов экспериментальных работ широко используется распределение Стьюдента. Дифференциальная функция этого распределения [7]:

$$S(t) = \frac{\Gamma(\frac{n}{2})}{\sqrt{\pi(n-1)}\Gamma(\frac{n-1}{2})} \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}} \quad (19)$$

где n – число данных x_i в выборке, а параметр t определяется как

$$t = \frac{x_i - x_{CP}}{\sigma} \quad (20)$$

где среднее значение по выборке $x_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ (21)

а среднее квадратическое отклонение частных значений x_i от среднего

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{CP})^2}{n-1}} \quad (22)$$

В формуле (19) участвует гамма функция $\Gamma(k)$. Если k (например, $k = n/2$) является целым положительными четным числом, то

$$\Gamma(\frac{n}{2}) = ((\frac{n}{2}) - 1)! \text{ т.е. } 1*2*3*...*(n/2)-1 \quad (23)$$

То же справедливо и для $k = (n-1)$

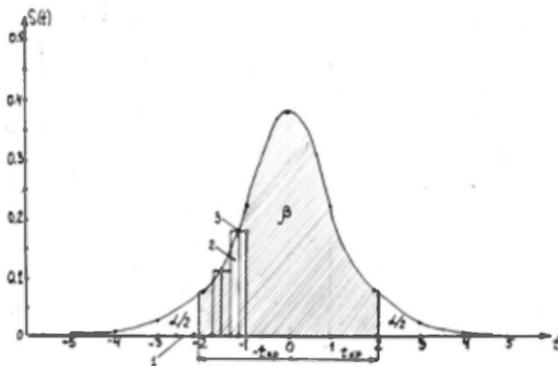
Если величина k является целым положительными нечетным числом, то

$$\Gamma(\frac{n}{2}) = ((\frac{n}{2}) - 1)((\frac{n}{2}) - 2)((\frac{n}{2}) - 3)... \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \quad (24)$$

Аналогичное выражение будет справедливо для $k = (n-1)$

Для решения практических задач обычно требуется интегральная функция, которая в случае распределения Стьюдента представляет собой вероятность попадания случайной величины в интервал от t_1 до t_2 :

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} S(t) \quad (25)$$



1 - шаг разбивки; 2 – элементарный прямоугольник; точка пересечения высоты прямоугольника с графиком функции; β – доверительная вероятность; α – уровень значимости; $t_{кр}$ критическое значение параметра распределения

Рисунок 2 - Функция распределения Стьюдента для $n=6$

Как известно, интеграл функции есть площадь, расположенная между ее графиком и осью абсцисс, а также пределами интегрирования слева и справа. Для определения площади интервал переменной t между пределами интегрирования делят на равные отрезки 1 (рисунок 2) – шаги интегрирования, из середины которых восстанавливают перпендикуляр 3 до пересечения с графиком функции. Высота перпендикуляра есть значение функции $S(t)$, определяемое по формуле (19). Перемножая шаг 1 на $S(t)$, находят площадь элементарного прямоугольника 2. Определенный интеграл есть сумма площадей всех прямоугольников в пределах интегрирования. Погрешность интегрирования тем меньше, чем меньше шаг.

Часто встречающейся статистической задачей является определение числа опытов n_{II} , необходимого для того, чтобы различие между средним значением x_{CP} по выборке (формула (21)) расходилось с генеральной средней $X_{Г}$ (по весьма большому числу аналогичных опытов, которые будут осуществлены при реализации проекта) на величину, не превышающую допустимой ошибки e .

$$n_{II} = \left(\frac{t_{кр} \sigma}{e} \right)^2 \quad (26)$$

где параметр t принимает критическое значение $t_{кр}$, когда так называ-

емая доверительная вероятность β того, что X_T не выйдет за рамки доверительного интервала от $-t_{кр}$ до $+t_{кр}$, (в данном случае за пределы).

$$x_{ср} - e < X_T < x_{ср} + e, \quad (27)$$

Не окажется ниже заданного значения. В геологической отрасли обычно принимается $\beta = 0.9$. Вероятность реализации хотя бы одного значения подлежащей распределению величины в интервале от $-\infty$ до $+\infty$ принята равной единице, и, следовательно, вероятность выхода этой величины за рамки доверительного интервала, равна $\alpha = 1 - \beta$. Эта вероятность называется уровнем значимости, который равен

$$1 - 0.9 = 0.1.$$

Поскольку распределение Стьюдента симметрично (рисунок 2) то уровень значимости разделяется на две площади $\alpha/2 = 0.05$, расположенные слева и справа от доверительного интервала от $-t_{кр}$ до $+t_{кр}$. Необходимое для формулы (26) значение $t_{кр}$, может быть определено как верхнее значение интервала от $-\infty$ до $-t_{кр}$, соответствующее вероятности $\alpha/2 = 0.05$.

Это делается методом перебора значений. В формулу (25) в качестве нижнего предела вместо $-\infty$ ставится значение с пренебрежимо малой вероятностью, а в качестве верхнего предела – значение, соответствующее некоторому $S(t)$, при котором значение $\alpha/2$ заведомо больше 0.05. Далее в рамках компьютерного цикла при постоянном нижнем пределе значение верхнего уменьшают на одну и ту же величину, пока соответствующая интегральная функция не станет меньше $\alpha/2$. Этот верхний предел (его абсолютное значение) и принимается за $t_{кр}$.

Программа определения $t_{кр}$ имеет следующую структуру:

1. Вводится число членов в выборке n и определяется его четность, в зависимости от которой программа ветвится;
2. В каждой из двух ветвей в рамках отдельных циклов по формулам (23) и (24) вычисляются значения гамма-функций;
3. Обе ветви сходятся к оператору, в котором помещается формула (19) в качестве подпрограммы-функции;
4. Организуется наружный цикл с параметром j , от 1 до 100;
5. Задаются пределы интегрирования: нижний $t_1 = -10$; верхний $t_2 = -1 - 0.01*j$, число шагов интегрирования $m = 100$ и величина шага $L = (t_2 - t_1)/m$;
6. Организуется внутренний цикл с параметром i , от 0 до $m-1$);

7. Определяется текущее значение $t = t_1 + L/2 + L \cdot i$, и по формуле (19) – высота элементарного прямоугольника $h=S(t)$ и его площадь $F(t) = L \cdot h$;

8. Суммируются элементарные прямоугольники с получением интеграла (25);

9. Закрывается внутренний цикл и проверяется условие $F(t) < 0.05$; при его невыполнении управление переходит к следующему j в наружном цикле, а при выполнении наружный цикл закрывается и $t_{кр}$ печатается.

Рассмотрим пример. Некоторым долотом по одной и той же породе и при прочих равных условиях пробурено 6 рейсов с механическими скоростями, приведенными в таблице 5.

Таблица 5 - Выборка по механическим скоростям бурения

i	1	2	3	4	5	6
V_i , м/ч	19	23	22	17	14	18

Результаты статистической обработки этой серии опытов даны в таблице 6.

Таблица 6 - Результаты обработки выборки с целью определения необходимого числа опытов n_n , при заданной ошибке среднего значения

n	$x_{ср}$, м/ч	σ , м/ч	e , м/ч	$\alpha/2$	$t_{кр}$	n_n	$n_{ни}$
6	18.83	3.31	1.5	0.05	2.00	19	15
	(21)	(22)			программа	(26)	программа

В таблице 6 в верхней строке слева направо обозначено: фактическое число опытов в выборке, среднее значение скорости, среднее квадратическое отклонение, допустимая ошибка генерального среднего значения, половина уровня значимости, критерий Стьюдента, необходимое число опытов, необходимое число опытов, скорректированное методом итераций (см. ниже) Во второй строке указаны соответствующие значения, а в третьей – формулы, по которым эти значения были найдены. Значения e и $\alpha/2$ приняты согласно приведенным соображениям, значение $t_{кр}$ рассчитано по вышеописанной программе.

Общепринятый метод, определении необходимого числа опытов согласно формуле (26) дает завышенные результаты, т. к. в формуле используется значение $t_{кр}$, относящееся к исходному числу опытов $n=6$, тогда как результирующее $n_n = 19$ опытов много выше, и поэтому

относящееся к нему значение критерия Стьюдента должно быть существенно ниже. Согласно описанной программе оно равно 1.74. Подставив его в формулу (26) получаем заниженное значение. Так, используя выше рассмотренный метод итераций, можно видеть, что их конечный результат сходится к $n_{ни} = 15$ опытов, что и дано в последнем столбце таблицы.

Выводы:

1. Показано, как быстрота и точность вычислений в рамках пользовательских компьютерных программ обеспечивает проведение виртуальных опытов, дающих подробную картину исследуемых процессов и снижающих затраты на последующее проведение экспериментальных работ;
2. Продемонстрировано хорошее сочетание компьютерных программ с методами вычислительной математики, с целью решения задач, трудно разрешимых методами математики традиционной;
3. Применительно к известным теориям разрушения горных пород при бурении составленные пользовательские программы позволили выявить и объяснить некоторые ошибки, а также уточнить теоретические положения с целью их сближения с практической деятельностью;
4. Составлена программа распределения Стьюдента, которая облегчает ее практическое использование, позволяет включать ее в качестве подпрограммы в пользовательские программы, а также обеспечивает ее сочетание с методами вычислительной математики.

Список литературы

- 1 *Мартин Ф.* Моделирование на вычислительных машинах // Советское радио, - 1972.- С. 255–260.
- 2 *Остроушко И.А.* Забойные процессы и инструменты при бурении горных пород // Горное дело, 1962. – № 4. – С. 260–271.
- 3 *Сулакшин С.С.* Технология бурения геологоразведочных скважин. - М.: Недра, 1973.- 316 с.
- 4 Технология бурения нефтяных и газовых скважин: / под общей ред. А.И. Спивака. - М.: Изд-во Недра, 2004.- 509 с.
- 5 *Владиславлев В. С.* Разрушение пород при бурении скважин. - М.: Гостоптехиздат, 1958. – 242 с.
- 6 *Калиткин Н.Н.* Численные методы. - М.: Наука, 1978. – 511 с.
- 7 *Венецкий И.Г., Венецкая В.И.* Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе. - М: Статистика, 1979. – 446 с