

УДК 001.89:629.7

Тынына С.В., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

Шевченко А.Е., канд. техн. наук
(Фрайбергская горная академия, Германия)

Шевелёва А.М., магистр
(ИТМ НАНУ и ГКАУ)

КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ПЛАНА МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

Тинина С.В., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН України)

Шевченко О.Є., канд. техн. наук
(Фрайберзька горна академія, Німеччина)

Шевельова Г.М., магістр
(ИТМ НАНУ та ДКАУ)

КРИТЕРІЙ ВИБОРУ ПЛАНУ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СКЛАДНИХ ПРОЦЕСІВ

Tynyna S.V., Ph.D. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

Shevchenko O.E., Ph.D. (Tech.)
(Freiberg Mining Academy, Germany)

Shevelova A.M., M.S (Tech.)
(ITM NASU and SSAU)

CRITERION FOR CHOOSING MULTIFACTOR-EXPERIMENT DESIGN FOR STUDYING COMPLEX PROCESSES

Аннотация. Выбор рационального плана эксперимента при исследовании сложных процессов позволяет сократить объем экспериментальных работ и упростить обработку опытных данных. Целью работы является исследование основных характеристик различных типов планов для выбора наиболее подходящего из них в зависимости от главного определяющего условия эксперимента. В статье представлена классификация планов активного эксперимента. Приведены основные свойства различных планов, отмечены их достоинства и недостатки. Определены критерии выбора плана. Рассмотрен порядок выбора плана на примере исследований по нормализации температуры подготовительных выработок глубоких шахт.

Представлены рекомендации по применению различных типов планов в зависимости от заданных условий эксперимента. Основными условиями, влияющими на выбор плана эксперимента, являются: степень изученности явления или процесса, наличие материальных средств и времени, а также предпочтения самого исследователя.

Ключевые слова: план эксперимента, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, композиционные планы, некомпозиционные планы.

1 Введение

Многие производственные процессы в промышленности и сельском хозяйстве являются сложными и не поддаются теоретическому описанию. Поэтому для их изучения целесообразно проводить экспериментальные исследования с большим количеством параметров (факторов).

Такие эксперименты называются многофакторными (МФЭ) и требуют значительных затрат времени и средств. Для сокращения объема работ при проведении экспериментов и анализе полученных в их ходе данных используют математическую теорию планирования эксперимента [1, 2].

В литературе приводится множество различных методов организации МФЭ, основанных на выборе планов проведения опытов и выполнении статистических расчетов [3-5]. При этом мало внимания уделяется вопросу выбора наиболее подходящих планов (планов с наименьшим количеством опытов и наибольшей информативностью) применительно к конкретным условиям, таким как: время на проведение экспериментальных исследований и наличие материальных средств.

Следует отметить, что при проведении экспериментов информация об объекте исследований, его основных свойствах, характере зависимостей, описывающих поведение объекта, является неполной или вовсе отсутствует. Поэтому при выборе методики проведения экспериментов исследователь полагается на свою интуицию и опыт.

Выбор плана и методики проведения эксперимента, основанный на имеющейся информации об объекте исследований, ресурсах и сроках проведения экспериментальных работ, является *актуальной* задачей при проведении исследований.

2 Постановка задачи

В настоящее время исследования, в которых невозможно с заданной степенью точности установить влияние основных параметров, не представляют интереса. Поэтому наиболее целесообразно проводить эксперименты с возможностью управлять параметрами в заданных диапазонах по желанию самого оператора (исследователя). При этом стоит задача выбора такого плана эксперимента, который обеспечит заданную точность измеряемых в ходе опытов параметров при минимальном количестве испытаний [1].

При планировании активных экспериментов могут быть использованы различные типы планов [6-8]: полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^k (где k – количество факторов); дробного факторного эксперимента (ДФЭ) 2^{k-p} (где p – число эффектов взаимодействия факторов); центральные композиционные планы (ЦКП) с ядром ПФЭ и ДФЭ; полные факторные планы n^k (где n – число уровней варьирования факторов); планы типа «Латинский квадрат»; некомпозиционные планы (НКП) [Box G.E.H., Behnken D.W., 1960] (рис. 1).

Следует помнить, что любой многофакторный план состоит из системы планов однофакторного эксперимента для каждого из параметров и опытов с совместным воздействием факторов.

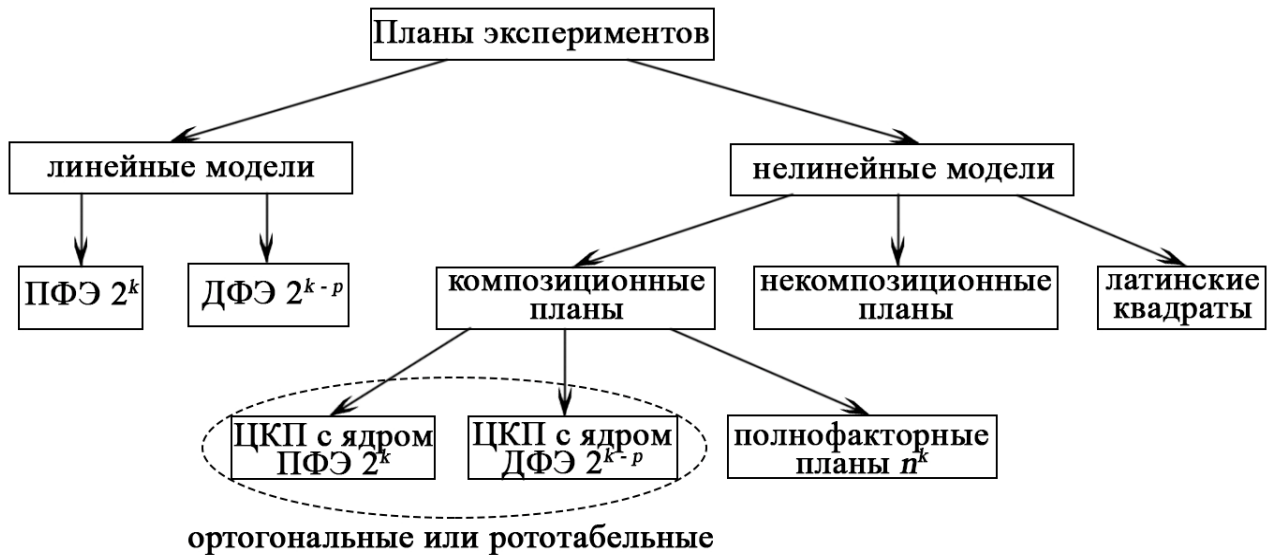


Рисунок 1 – Классификация планов эксперимента

Целью данной работы является исследование основных характеристик различных типов планов для выбора наиболее подходящего из них при проведении экспериментов в зависимости от главного определяющего условия, например, суммарного времени на проведения экспериментов или материальных затрат.

3 Выбор определяющих условий

При планировании эксперимента, в частности – при выборе определенного типа плана проведения опытов, необходимо:

1. Описать исследуемую систему как совокупность входных и выходных параметров, которую можно представить в виде блок-схемы (рис. 2).



Рисунок 2 – Блок-схема исследуемой системы

Данная совокупность содержит все параметры, описывающие работу системы. Из этой совокупности для исследования необходимо оставить только те факторы, которые удовлетворяют требованиям [9]:

– параметры должны быть управляемыми, т.е. устанавливаются по желанию оператора с заданной точностью;

– точность измерения входной величины должна быть на порядок выше, чем выходной;

– параметры должны быть однозначными и функционально независимыми друг от друга;

– параметры должны быть совместимы, т.е. не вызывать аварийных ситуаций в работе исследуемого устройства.

Таким образом, общая система параметров уменьшится до некоторого количества *независимых* параметров.

2. Определить тип зависимости, которую исследователь должен получить на выходе исследования: линейная или нелинейная модель (логарифмическая, квадратичная и других порядков). От выбора типа модели зависит количество уровней варьирования входных параметров, а следовательно – число опытов плана эксперимента.

На выбор типа зависимостей влияет степень изученности исследуемого процесса или явления: процесс изучается впервые или оптимизируется, устанавливаются его рациональные параметры, уточняются особенности его протекания в определенной области или определяется степень влияния его факторов.

3. Оценить материальные и временные затраты, необходимые для проведения полной серии экспериментов с учетом повторений опытов и контрольных замеров.

Следует учитывать, что каждый тип плана имеет свои достоинства и недостатки (табл. 1).

Главным недостатком всех планов является зависимость их результатов от качества постановки эксперимента.

Все вышеприведенные планы экспериментов подразумевают, что измеряемые в ходе опытов случайные величины подлежат нормальному закону распределения [6]. Однако на практике это может быть не так. Поэтому для установления закона распределения измеряемых экспериментальных параметров следует проводить значительное количество параллельных опытов, хотя бы на некоторых уровнях системы.

С учетом вышеприведенных требований, а также преимуществ и недостатков планов, порядок выбора плана можно представить в виде схем (рис. 3 – 4). На рисунках приняты обозначения: БС. Пр.– блок-схема процесса; Неупр. П. – неуправляемые параметры; У. П. – управляемые параметры; Треб. П. – требования к параметрам; Н. П. – независимые параметры; М. – модель; Эксп. – эксперимент; Предв. Оп. – предварительные опыты; Незнач. П. – незначимые параметры; З. Р. – закон распределения измеряемых величин; Знач. П. – значимые параметры.

Таблица 1 – Основные достоинства и недостатки планов эксперимента

План	Достоинства	Недостатки
ПФЭ	относительная простота трактования при малом числе взаимодействий	большое число опытов при большом количестве варьируемых параметров; необходимость проведения значительного количества контрольных измерений
ДФЭ	небольшое количество опытов	смешение реплик и сложность их трактования
ЦКП	небольшое количество опытов в сравнении с другими планами для нелинейных моделей; возможность увеличения степени модели; возможность оптимизации; большой диапазон исследования параметров	проблемы реализации опытов из-за требований к высокой точности по нормировке входных параметров
ПФЭ n^k ($n \geq 3$)	высокая точность и информативность модели; возможность увеличения степени модели; возможность оптимизации; большой диапазон исследования параметров	большое количество опытов
НКП	малое количество опытов в сравнении с ЦКП и ПФЭ n^k ; малое число уровней варьирования ($n = 3$)	более низкая информативность в сравнении с планами ЦКП и ПФЭ n^k
Латинский квадрат	диапазон варьирования входных параметров и количество уровней устанавливаются независимо для каждого из параметров	большое число опытов из-за большого числа уровней варьирования

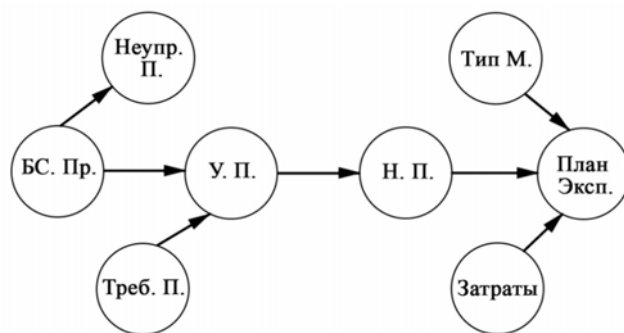


Рисунок 3 – Схема выбора плана эксперимента без проведения предварительных опытов

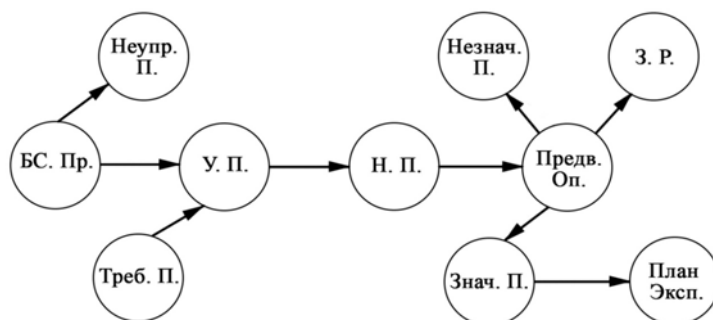


Рисунок 4 – Схема выбора плана эксперимента с проведением предварительных опытов

4 Пример использования схемы

Рассмотрим порядок выбора плана при проведении исследований по нормализации температуры подготовительных выработок глубоких шахт [10-11]. Предметом исследования являлись параметры процесса нормализации шахтной атмосферы, которые при стандартной схеме проветривания являются функцией температуры, скорости движения воздуха, теплопроводности массива, количества тепла и т. д. Всего параметров около двух десятков. Выявление степени влияния каждого из них является крайне затруднительным. Даже при проведении дробно-факторных экспериментов.

В связи с этим сокращение числа опытов путем отсеивания незначимых и зависимых параметров является необходимой задачей. После выбора управляемых, независимых факторов были проведены предварительные опыты, которые позволили отобрать наиболее значимые параметры. Из этих параметров были сформированы четыре безразмерных комплекса, половина из которых являлась масштабной величиной. Так, расстояние от среза проветривающего става до поверхности торца забоя выражалось как n диаметров става. А скорость истечения воздуха из проветривающего става была выражена через скорость циркуляции воздуха в выработке. И диаметр става, и скорость воздуха в выработке были приняты в качестве постоянных величин. Это дало возможность использовать планы полных факторных экспериментов, снизив общее число опытов минимум в два раза.

Рекомендации

1. Наилучшим способом изучения влияния отдельных факторов при предварительных исследованиях является проведение однофакторных экспериментов в различных интервалах факторного пространства для выявления динамики влияния отдельных факторов, а также интенсивности отклика на данный фактор.

Предварительные эксперименты значительно снижают затраты и уменьшают сроки проведения исследований, особенно когда являются перекрестными, т.е. когда факторы, участвующие в одном эксперименте, частично используются в другом. Такие опыты часто выступают в роли отсеивающих и позволяют избавиться от незначимых параметров.

2. Наиболее информативными являются полнофакторные исследования. Поэтому при выборе плана эксперименты следует организовать таким образом, чтобы в одном эксперименте участвовало максимальное количество параметров.

3. Выбор плана основывается в первую очередь на типе модели (рис. 5).

Если на основании ранее проведенных исследований известно, что исследуемый процесс описывается нелинейной моделью (рис. 1), в этом случае наиболее рационально использовать некомпозиционные планы, так как они требуют проведения наименьшего числа опытов при минимальном количестве уровней варьирования входных факторов в сравнении с планами ОЦКП и РЦКП.

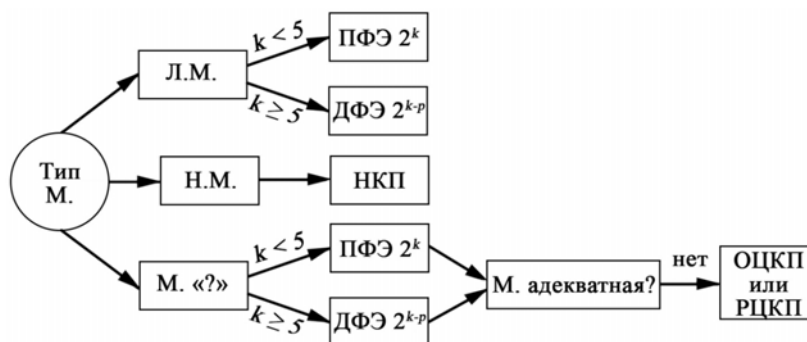


Рисунок 5 – Рекомендации по выбору плана эксперимента

Если известно, что исследуемый процесс описывается линейной моделью, следует использовать планы типов ПФЭ или ДФЭ.

Если тип модели неизвестен, сначала выполняют ПФЭ или ДФЭ, после чего проверяют модель на адекватность. При не соблюдении условия адекватности для линейной модели переходят к планам более высоких порядков: ОЦКП или РЦКП с соответствующим ядром (ПФЭ или ДФЭ).

4. Для исключения грубых и систематических ошибок и повышения точности опыты должны быть организованы так, чтобы экспериментатор в процессе их проведения мог легко выделить влияние каждого из факторов или трансформировать один опыт предполагаемого (выбранного) плана в другой, в целом сохраняя параметры системы.

Заключение

К одному и тому же эксперименту с равной степенью эффективности можно применять различные планы. Поэтому основным критерием выбора плана эксперимента является экспериментаторский опыт исследователя.

Немаловажную роль играет степень совершенства материально-технической базы, поскольку данное условие зачастую определяет длительность проведения отдельно взятого опыта и выполнения полного плана эксперимента.

Для снижения затрат и уменьшения времени, которое затрачивается на проведение основной серии экспериментов, целесообразно использовать предварительные опыты. При проведении предварительных опытов не следует прибегать к сложным планам.

Основными условиями, влияющими на выбор плана эксперимента, являются: степень изученности явления или процесса, наличие материальных средств и времени, а также предпочтения самого исследователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спири́н, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / Н. А. Спири́н, В. В. Лавров. Под общ. ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
2. Рыков, В. В. Математическая статистика и планирование эксперимента / В. В. Рыков, В. Ю. Иткин. – М.: Российский государственный ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. – 210 с.
3. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М.: ДеЛиПринт, 2005. – 294 с.

4. Гмурман, Е. Теория вероятностей и математическая статистика.– М.: Высшая школа, 2001.– 479 с.
5. Шашков, В. Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.
6. Хамханов, К. М. Основы планирования эксперимента. Методическое пособие / К. М. Хамханов. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный технологический университет, 2001. – 94 с.
7. Архипов, В. А. Основы теории инженерно - физического эксперимента: учебное пособие / В. А. Архипов, А. П. Березиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 206 с.
8. Бурькин, А. А. Теория эксперимента. Курс лекций. – Екатеринбург: УРФУ, 2012. – 163 с.
9. Любченко, Е. А. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Часть 1 / Е. А. Любченко, О. А. Чуднова. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. –156 с.
10. Тынына, С. В. Обоснование параметров способа нормализации температуры воздуха призабойной зоны подготовительных выработок глубоких шахт с применением вихревых кондиционеров: дисс. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / С. В. Тынына; ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – 252 с.
11. Тынына, С. В. Экспериментальная установка для проведения исследований по снижению температуры тупиковых подготовительных выработок глубоких шахт / С. В. Тынына // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 113. – С. 145-151.

REFERENCES

1. Spirin, N. A. and Lavrov, V. V. (2004), *Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov inzhenernogo eksperimenta: Konspekt lektсий (otdelnye glavy iz uchebnika dlya vuzov)* [Methods of planning and treatment of results of engineering experiment: Abstract of lectures (separate heads from a textbook for institutes of higher)], GOU VPO UGTU -UPI, Ekaterinburg, RU.
2. Rykov, V. V. and Itkin, V. Ju. (2008), *Matematicheskaja statistika i planirovanie eksperimenta* [Mathematical statistics and planning of experiment], Rossiyskiy gos. universitet nefti i gaza im. I.M. Gubkina, Moscow, RU.
3. Grachev, Ju. P. and Plaksin, Ju. M. (2005), *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov* [Mathematical methods of planning of experiments], DeLiPrint, Moscow, RU.
4. Gmurman, E. (2001), *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of chances and mathematical statistics], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
5. Shashkov, V.B. (2003), *Prikladnoy regressionnyy analiz. Mnogofaktornaya regressiya: Uchebnoe posobiye* [Applied regressive analysis. Multifactor regression: Train aid.], GOU VPO OGU, Orenburg, RU.
6. Hamhanov, K. M. (2001), *Osnovy planirovaniya eksperimenta. Metodicheskoe posobie* [Bases of planning of experiment. Methodical manual], Vostochno-Sibirskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet, Ulan-Ude, RU.
7. Arhipov, V. A. and Berzikov, A. P. (2008), *Osnovy teorii inzhenerno-fizicheskogo eksperimenta: uchebnoe posobie* [Bases of theory engineering - physical experiment: train aid], Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Tomsk, RU.
8. Burykin, A. A. (2012), *Teoriya jeksperimenta. Kurs lektсий* [Theory of experiment. Course of lectures], URFU, Ekaterinburg, RU.
9. Ljubchenko, E. A. and Chudnov, O. A. (2010), *Planirovanie i organizatsiya eksperimenta: uchebnoe posobie. Chast 1* [Planning and organization of experiment: train aid. Part 1], Izd-vo TGJeU, Vladivostok, RU.
10. Tynyna, S. V. (2015), «Ground of parameters of method of normalization of temperature of air of by-face area of the preparatory making of deep mines with the use of vortical conditioners»: Ph.D. Thesis, 05.26.01, IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.
11. Tynyna, S. V. (2013), «Experimental setting for conducting of researches on the decline of temperature of the deadlock preparatory making of deep mines», *Geo-Tehnnical Mechanics*, no. 113, pp. 145-151.

Об авторах

Тынына Сергей Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С.

Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины), Днепр, Украина, otd-8-11@mail.ru.

Шевченко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, инженер, Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия.

Шевелёва Анна Михайловна, магистр, младший научный сотрудник отдела термогазодинамики энергетических установок, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ), Днепр, Украина, belgorod98@i.ua.

About the authors

Tynyna Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, otd-8-11@mail.ru.

Shevchenko Aleksandr Yevgenjevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Engineer in the Freiberg Mining Academy, Freiberg, Germany.

Sheveleva Anna Mikhaylovna, Master of Science, Junior Researcher in the Thermogasdynamics Department of Power Plants, Institute of Technical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine (ITM NASU and SSAU), Dnepr, Ukraine, belgorod98@i.ua.

Анотація. Вибір раціонального плану експерименту при дослідженні складних процесів дозволяє скоротити обсяг експериментальних робіт і спростити обробку досвідних даних. Метою роботи є дослідження основних характеристик різних типів планів для вибору найбільш придатного з них в залежності від головної визначальної умови експерименту.

В статті представлено класифікацію планів активного експерименту. Наведено основні властивості різних планів експерименту, відмічено їх переваги та недоліки. Визначено критерії вибору плану та надано рекомендації щодо застосування різних типів планів в залежності від заданих умов експерименту.

Розглянуто порядок вибору плану на прикладі досліджень з нормалізації температури підготовчих виробок глибоких шахт. Представлено рекомендації із застосування різних типів планів в залежності від заданих умов експерименту. Основними умовами, що впливають на вибір плану, є: ступінь вивченості явища або процесу, наявність матеріальних ресурсів та часу, а також вподобання самого дослідника.

Ключові слова: план експерименту, повний факторний експеримент, дробовий факторний експеримент, композиційні плани, некомпозиційні плани.

Annotation. Rational experiment design properly chosen for studying complex processes makes it possible to reduce amount of experimental works and to simplify experimental data processing. Purpose of the work is to study main characteristics of different design types for choosing the most suitable one depending on the main determining condition of the experiment.

Classification of designs for active experiment is presented in the article, as well as main properties of various designs and their key advantages and disadvantages. Criteria are determined for proper design choosing, and procedure of the design choosing is considered on the example of studies on the temperature normalization in the preparatory workings of the deep mines.

Recommendations for applying different types of designs are presented depending on the given experimental conditions. Main conditions, which influence the choice of experiment design, include: degree of the phenomenon or process study, availability of material resources and time, as well as the researcher's preferences.

Key words: experimental design, full factorial experiment, fractional factorial experiment, composite designs, non-positional designs.

Статья поступила в редакцию 30.08.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.И. Дырдой