

Автореф.
В 19

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М.В.Ломоносова

На правах рукописи

ВАСИЛЬЧЕНКО ЛАРИСА НИКОЛАЕВНА

УДК 519.242:536.71

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Специальность 01.04.14 - теплофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОДЕССА - 1984

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и в Одесском технологическом институте холодильной промышленности.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Кессельман П.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Геллер В.З.,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Кулешов Г.Г.

Ведущая организация: Одесский институт инженеров
морского флота.

Защита диссертации состоится "13" декабря 1984 г.
в 12³⁰ часов на заседании специализированного совета К 068.35.04
в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им.
М.В.Ломоносова по адресу: 270108, Одесса, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского
технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломо-
носова.

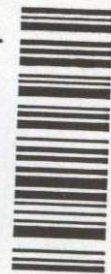
Автореферат разослан "12" ноября 1984 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
И.И., доцент

Г.И.Элькин

ОНАХТ 01.07.11

Применение теории пл



v014779

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При решении многих научно-технических задач, связанных с проектированием и разработкой современных технологических процессов в нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, необходимо располагать надежными данными о теплофизических свойствах широкого круга веществ. Число различных веществ, применяющихся в качестве исходных, промежуточных и конечных продуктов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, превышает уже две тысячи и продолжает непрерывно расти. Основным, а в ряде случаев - единственно возможным источником данных о теплофизических свойствах индивидуальных веществ и их смесей служит в настоящее время эксперимент. Современный теплофизический эксперимент (ТФЭ) (в т.ч. экспериментальное исследование теплофизических свойств веществ) связан с применением дорогостоящей аппаратуры, привлечением высококвалифицированных специалистов и значительными затратами времени.

В связи с этим большое значение приобретает проблема повышения эффективности экспериментальных исследований, ускорения их и экономии материальных ресурсов при их проведении. Решить эту проблему невозможно без применения методов теории планирования эксперимента (ПЭ), позволяющих организовать исследования с наименьшими затратами средств и времени. Теория ПЭ нашла широкое применение во многих отраслях науки и техники. Вместе с тем в силу ряда специфических причин, таких как высокий уровень точности измерений, выдвигающий на первый план проблему адекватности применяемых математических моделей; сложный вид используемых обычно уравнений регрессии, искомые параметры которых зачастую входят нелинейно и т.д., методы ПЭ не находили применения в исследованиях теплофизических свойств веществ.

В настоящей работе поставлена задача восполнения указанного пробела. Она выполнена в рамках решения научно-технической проблемы О.80.18 "Разработать и внедрить отраслевую систему стандартизации и расчета теплофизических свойств веществ для предприятий и организаций МХП СССР" / задание 03.15 по координационному плану ГКНТ СССР /.

Цель работы: Разработка методики планирования эксперимента по исследованию теплофизических свойств веществ и построение опти-

№ 014449

Ленинский технологический институт пищевой промышленности
Академия наук СССР

БИБЛИОТЕКА

Переучет 19/84

мальных планов решения ряда наиболее часто встречающихся в исследовательской практике задач с учетом особенностей теплофизического эксперимента.

Научная новизна работы. Предложен способ последовательного планирования теплофизического эксперимента с поэтапной проверкой адекватности используемых для обработки опытных данных математических моделей. Методы теории ПЭ впервые применены для оптимизации процесса проведения экспериментальных исследований термодинамических свойств чистых веществ в газовой, жидкой фазах и на линии насыщения, а также градуировочных опытов в некоторых задачах метрологии.

Автор защищает:

1. Методику поэтапного планирования экспериментального исследования теплофизических свойств веществ, предусматривающую проверку адекватности применяемых математических моделей;
2. Эффективность применения прямых методов поиска максимума определителя информационной матрицы для построения D -оптимальных планов эксперимента;
3. Оптимальные планы решения задач экспериментального исследования давления насыщенных паров чистого вещества, $P - \rho - T$ - измерений в газовой и жидкой фазах, температурной зависимости второго вириального коэффициента и параметров ряда эталонных датчиков температуры.

Практическая ценность работы. Внедрение оптимального планирования в практику ТФЭ позволяет существенно повысить эффективность экспериментальных исследований теплофизических свойств веществ. Применение разработанных планов дает возможность резко сократить число необходимых измерений без ущерба для точности описания результатов опыта. При этом появляется возможность сосредоточить измерения в тех областях параметров состояния, в которых они несут наибольшую информацию о поведении исследуемых свойств. В рамках автоматизированных систем генерации информации о теплофизических свойствах веществ предлагаемая методика позволяет отбирать из массивов имеющихся опытных данных наиболее информативную их часть и существенно уменьшать тем самым необходимый для хранения такой информации объем машинной памяти.

Реализация результатов работы. Комплекс программ и таблиц

Передано в печать

Информационно-методический центр
 Института теплофизики
 СО АН СССР
 450000, Новосибирск
 БИБЛИОТЕКА

оптимальных планов внедрены в Автоматизированную единую систему теплофизического абонирования (АВЕСТА) и во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений. Справки об использовании результатов работы прилагаются к диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на 7-й Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ (Ташкент, 1982 г.); Всесоюзной конференции "Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов" (Харьков, 1983 г.); Всесоюзном семинаре по методам исследования изохорной теплоемкости в широкой области параметров состояния (Махачкала, 1982 г.); координационном совещании по вопросам создания отраслевого фонда стандартных справочных данных о ТФС углеводородов и нефтепродуктов (Киев, 1983 г.), а также на ряде семинаров.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 107 страницах машинописного текста и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 83 наименований и приложения. Работа содержит 25 таблиц, 16 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена цель работы, дана аннотация новых научных положений, которые защищает автор.

В первой главе приведен обзор основных положений теории планирования регрессионных экспериментов. Проведен анализ методов ПЭ при нелинейной параметризации уравнения регрессии, кратко рассмотрены методы построения оптимальных планов для неадекватных моделей.

Вторая глава посвящена разработке методики оптимизации эксперимента при исследовании теплофизических свойств веществ. С точки зрения применения методов ПЭ для ТФС характерны следующие особенности:

1. Для описания экспериментальных данных используется широкий спектр уравнений, в т.ч. уравнения состояния, имеющие довольно сложный вид, отражающий иногда даже наличие особых точек (например, критической точки);

2. Число независимых факторов в теплофизических исследованиях обычно невелико, реальный интерес представляют даже регрессионные

уравнения с одним контролируемым фактором (например, уравнения, описывающие коэффициенты вязкости и теплопроводности разреженного газа, свойства чистого вещества на линии насыщения и т.д.). Математические модели с большим числом независимых факторов встречаются значительно реже, в основном при исследовании многокомпонентных смесей и растворов.

3. ТФЭ характеризуется довольно высокой точностью измерений, что выдвигает на первый план проблему адекватности применяемых моделей. Несмотря на то, что для данной модели обычно известен круг описываемых объектов, при исследовании каждого нового вещества обычно нет уверенности в полной адекватности используемой модели.

4. Контролируемые факторы (объем, давление, температура, состав) могут быть неравнозначными, т.е. изменение одного из них в процессе эксперимента может быть связано со значительно большими трудностями, чем другого.

Любая методика ПЭ, предназначенная для оптимизации ТФЭ, должна предусматривать проверку адекватности модели в процессе эксперимента, учитывая при этом, что характер неадекватности, как правило, заранее неизвестен. Кроме того, она должна обеспечивать возможность построения планов при существенной нелинейности функции отклика относительно искомых параметров. Большое разнообразие применяемых математических моделей делает необходимым создание алгоритма построения оптимальных планов, пригодного для широкого спектра функций отклика, описывающих различные теплофизические свойства веществ в различных агрегатных состояниях.

В разработанной методике используется D-оптимальный план (совокупность точек, в которых необходимо провести измерения), соответствующий наименьшему на множестве всех возможных планов определителю ковариационной матрицы оценок коэффициентов уравнения регрессии и наибольшему определителю информационной матрицы Фишера.

В случае одного контролируемого фактора методика построения D-оптимальных планов измерений целиком определяется видом уравнения регрессии (например, уравнения состояния) и функции эффективности эксперимента. В простейшем случае полиномиальной регрессии для ряда характерных зависимостей функции эффективности эксперимента задача допускает точные решения. Они могут использоваться как для построения конкретных оптимальных планов, так и для контроля точности нахождения планов численным методом.

При нелинейной зависимости уравнения регрессии от искомых па-

раметров невозможно составить план эксперимента без наличия априорной информации об этих параметрах. Поэтому предварительно производится линеаризация модели, задаются некоторые начальные оценки искоемых параметров и строится начальный план. Получение экспериментальной информации по начальному плану дает возможность построить план с использованием более точной оценки искоемых параметров. При незначительном изменении определителя информационной матрицы начальный план можно считать оптимальным. Опыт применения такой методики показывает, что, как правило, при этом оказывается достаточно оценить нелинейно входящие в уравнение параметры лишь по порядку величины.

В случае двух и большего числа контролируемых факторов (исследование P - Q - T и других свойств в однофазном состоянии) способ построения оптимальных планов зависит также от применяемого экспериментального метода и геометрической формы области планирования. В качестве примеров рассмотрены задачи ПЭ по исследованию сжимаемости газа $Z(\rho, T)$ методом пьезометра постоянного объема и изохорной теплоемкости $C_v(P, T)$ в случае использования полиномиальной модели.

В работе даны рекомендации по выбору способа построения D -оптимальных планов ПФЭ для различных видов зависимостей (полиномиальный, общий вид с линейно и нелинейно входящими в него параметрами), экспериментальных методов (с равнозначными и неравнозначными факторами) и формы области планирования (правильная либо произвольная).

В простейшем случае сочетания полиномиальной модели с областью планирования правильной формы, либо с явно неравнозначными факторами удается найти оптимальный план путем последовательного применения процедуры однофакторного планирования. В более общем случае необходим поиск минимума определителя ковариационной матрицы оценок неизвестных коэффициентов регрессии в $k \times m$ -мерном пространстве, где k - число неизвестных коэффициентов, а m - число контролируемых факторов. Для этой цели в работе используются прямые методы поиска условного экстремума функции многих переменных, причем в качестве критерия оптимальности вместо условия минимума определителя упомянутой ковариационной матрицы используется более простое, но эквивалентное условие максимума определителя обратной ей информационной матрицы Фишера.

Как отмечалось выше, методика планирования должна предусматривать контроль адекватности используемой модели (уравнения состояния). Основной причиной возможной неадекватности применяемых урав-

нений состояния является эмпирический характер большинства применяемых зависимостей, а также использование в теоретически обоснованных моделях упрощающих предположений о характере взаимодействия молекул и других допущений, наличие примесей в исследуемом веществе и т.д.

Приступая к изучению нового вещества, исследователь как правило на основе имеющегося опыта может со значительной долей уверенности выбрать подходящие для обработки предстоящего эксперимента уравнения. Если исключить из рассмотрения редкие в практике ТФЭ исследования, преследующие цель выявления тех или иных неизвестных заранее аномалий в поведении вещества, то проверка степени адекватности применяемой модели сводится обычно к выяснению ее способности описывать результаты эксперимента с необходимой точностью. В практике обработки экспериментальных данных для этой цели обычно используют некоторую часть опытных точек, не включаемых в обработку и используемых как "контрольные".

В случае применения методов ПЭ возникает вопрос о принципе, согласно которому можно было бы заранее выбрать положение контрольных точек на термодинамической поверхности. В качестве такого принципа в реферируемой работе предлагается использовать условие минимума дисперсии предсказания уравнения регрессии. Если, как это обычно имеет место в ТФЭ, отклонение результатов опытов от предсказаний математической модели невелики и характер возможной неадекватности модели заранее не известен, вероятность обнаружить значимые отклонения измеренных значений от рассчитанных по уравнению регрессии максимальна в тех точках, в которых минимальна дисперсия предсказания этого уравнения.

Таким образом, суть предложенной методики ПЭ кратко сводится к следующему: вначале, исходя из целей исследования и возможностей экспериментального метода выбирается область планирования, т.е. область изменения параметров состояния, в которой необходимо провести измерения. Затем выбирается уравнение, которым предполагается описывать экспериментальные данные. Для выбранной модели находится спектр D -оптимального плана, т.е. те точки на термодинамической поверхности, в которых необходимо сосредоточить измерения исследуемой величины. По результатам эксперимента, проведенного по плану, определяются коэффициенты модели. Для проверки адекватности модели эксперимент проводится также в дополнительных контрольных точках. В случае, если проверка адекватности показала несостоятель-

ность используемой модели, то описанная выше последовательность действий повторяется для уточненной модели, в противном случае исследование завершается.

Численная процедура построения оптимальных планов и нахождения контрольных точек реализована в работе на основе известных методов нелинейного программирования, позволяющих эффективно находить условный экстремум функции. Программный комплекс, реализующий изложенную выше методику, позволяет использовать произвольные регрессионные модели и функции эффективности эксперимента, для чего предусмотрено подключение соответствующих подпрограмм, составленных пользователем.

В третьей главе изложены результаты построения оптимальных планов экспериментального решения ряда однофакторных задач, наиболее часто встречающихся при исследовании теплофизических свойств веществ.

Определение температурной зависимости второго вириального коэффициента (ВВК) на основе планируемого P - V - T эксперимента распадается на две задачи. Первая состоит в построении оптимального плана определения значения ВВК на изотерме, т.е. нахождении тех значений плотности, при которых надо измерить сжимаемость газа, а вторая - в нахождении значений температур, на которых надо определить ВВК для заданного вида его температурной зависимости. Показано, что первая задача может быть сведена к построению оптимального плана для одномерной полиномиальной регрессии на отрезке $[-1, +1]$ в случае, когда эффективность пропорциональна $(1+x)^2$. Решение этой задачи сводится к нахождению корней полинома Якоби $P_m^{(\alpha, \beta)}(x)$ при $\alpha \rightarrow -1$. Найдены соответствующие точки спектра плана для ряда значений степеней полинома, обычно используемого в практике выделения вириальных коэффициентов.

Задача нахождения оптимальных значений температур решена для случая, когда температурная зависимость ВВК аппроксимируется полиномом k -той степени по обратным степеням температуры. Эта задача сводится к вычислению корней полинома Лагерра $L_k^{(\beta)}(x)$ - т.е. к точному решению задачи построения D -оптимального плана для одномерной полиномиальной регрессии на полусоси $[0, +\infty)$ с функцией эффективности эксперимента, пропорциональной e^{-x} . Здесь фактор планирования имеет вид

$$\bar{x} = \frac{2r}{R} \cdot \left(\frac{f}{T} - \frac{f}{T_{\max}} \right),$$

где Γ - теплота испарения, T_{max} - максимальная температура опыта.

Нижний температурный предел не оказывает на положение точек плана, так как по мере понижения температуры интервал плотностей существования газовой фазы резко сокращается и, соответственно, эффективность эксперимента по выделению ВВК падает. Оценивая соотношения между критической температурой и температурой нормального кипения как $T_{н.к}/T_{к} \approx 0,6$ и применяя закон Трутона, можно выразить температурный спектр оптимального плана в виде

$$T_i = T_{max} / (1 + T_{max} / (12 T_{к} \cdot X_i)),$$

где X_i - корни полинома $x \cdot L_n^{(a)}(x)$.

Среди однофакторных задач ТФЭ одной из наиболее практически важных является исследование упругости паров P_g чистого вещества в зависимости от температуры.

Задача построения оптимальных планов экспериментального исследования $P_g(T)$ в работе решена применительно к трем видам эмпирических уравнений - Вагнера:

$$\ln(1-\pi) = [A(1-\tau) + B(1-\tau)^{1,5} + C(1-\tau)^3 + D(1-\tau)^6] / \tau, \quad (1)$$

Ван-Тодоса:

$$\lg \pi = A + B \cdot \tau + C \cdot \tau^5 + D \cdot \lg \tau, \quad (2)$$

и Коломийца:

$$\ln \pi = \ln \tau / \tau \cdot \{F(\tau) + D \cdot \exp[E \cdot (1-\tau)]\}, \quad (3)$$

$$F(\tau) = A + B \cdot \tau + C \cdot \tau^4,$$

где $\tau = T/T_{к}$, $\pi = P/P_{к}$, A, B, C, D, E - эмпирические коэффициенты.

Первые две модели линейны относительно искомых параметров, третья содержит параметр, входящий нелинейно. D-оптимальные планы для этих трех моделей построены с использованием описанной выше методики в интервале температур от тройной до критической в случае постоянной функции эффективности эксперимента.

Вместо проведения натурального планируемого эксперимента для проверки эффективности методики ПЭ в работе применяется метод выборки

из массивов опубликованных различными авторами опытных данных. В этих массивах находятся экспериментальные точки, наиболее близкие к точкам спектра оптимального плана и по ним определяются параметры уравнения регрессии. Проверка адекватности также ведется по опытным точкам, ближайшим к точкам минимума дисперсии. Небольшие отклонения в положении этих точек от точных значений, отвечающих максимуму определителя информационной матрицы, неизбежно возникающие при таком подходе, оказываются незначительными в силу слабого изменения величины определителя вблизи максимума. Некоторые результаты расчетов давления насыщенного пара азота иллюстрируются рис. 1 - 3. Аналогичные расчеты проведены для этилена, метана и аргона.

Таблица I.

Зависимость средних квадратических отклонений давления насыщенных паров азота от числа опытных точек, использованных при определении коэффициентов уравнения Вайнера (I).

Число точек	$\delta P_{\text{ср}}, \%$
4*)	0,18
4**)	0,056
6	0,060
10	0,054
17	0,055
60	0,053

Примечание: *) обозначен план с равномерным распределением точек, а **) - D-оптимальный план.

Из табл. I видно, что добавление избыточных по отношению к плану экспериментальных точек практически не улучшает точности описания результатов опыта. Таким образом, применение оптимального планирования позволит существенно сократить объем необходимых измерений.

К задачам однофакторного планирования относятся также многие градуировочные эксперименты. В работе приведены рассчитанные оптимальные планы определения параметров градуировочных зависимостей ряда образцовых датчиков температуры, выпускаемых ВНИИФТРИ: термометры пары медь - медь + железо + цинк; термометра сопротивления из стеклоуглерода; образцовой дилатометрической меры из меди. Математические модели, используемые на практике для описания градуировоч-

ных зависимостей, сводятся к полиномиальному виду и позволяют применять для составления оптимальных планов как численные методы, так и, в случае постоянной функции эффективности эксперимента, точные решения. Это дает возможность проверки эффективности используемой численной процедуры построения оптимальных планов. Приведено сравнение результатов расчета с точным решением для ряда моделей и тем самым оценены пределы применимости упомянутой процедуры.

Четвертая глава посвящена определению параметров термических уравнений состояния чистого вещества на основе планируемого эксперимента. Простейшим случаем планирования двухфакторного эксперимента по исследованию P - ρ - T зависимости является исследование сжимаемости в газовой фазе, когда в качестве математической модели используется уравнение состояния в полиномиальной форме:

$$\frac{Z-1}{X} = \sum_{i=0}^k B_i \cdot X^i, \quad (4)$$

$$B_i = \sum_{j=0}^l b_{ij} \cdot y^j \quad (5)$$

Здесь $Z = P/\rho RT$ - коэффициент сжимаемости.

В качестве независимых факторов X и y чаще всего используются плотность, давление и температура (либо обратная ей величина). Для прямоугольной области планирования удобно использовать независимые факторы, приведенные к интервалу $[0, 1]$:

$$X = \rho / \rho_{\max} \quad \text{либо} \quad X = P / P_{\max},$$

$$y = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad \text{либо} \quad y = \frac{1/T - 1/T_{\max}}{1/T_{\min} - 1/T_{\max}}.$$

Рассматриваемая задача ПЭ может быть сведена к последовательному применению однофакторного планирования. Оптимальные планы для ряда значений k - максимальных степеней полинома по плотности либо давлению, приведены в табл.2. При постоянной погрешности измерения давления (плотности) функция эффективности эксперимента для модели (4) оказывается обратно пропорциональной квадрату плотности (давления). Поэтому точки спектра плана "вытесняются" из области идеального газа и попадают в область, где существен вклад реальности. Для получения значений температур, при которых необходимо провести измерения, можно воспользоваться Табл.3, в которой

приведены точки спектра оптимального плана для различных степеней l полинома (5).

Таблица 2.

Спектр оптимального плана определения коэффициентов уравнения (4) при различных степенях полинома K .

K	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	0,5	I				
2	0,2764	0,7236	I			
3	0,1726	0,5	0,8273	I		
4	0,1175	0,3574	0,6426	0,8825	I	
5	0,0849	0,2656	0,5	0,7344	0,9151	I

Таблица 3.

Спектр оптимального плана определения температурной зависимости коэффициентов уравнения (5).

l	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
7	0	0,0849	0,2656	0,5	0,7344	0,9151	I		
8	0	0,0641	0,2041	0,3953	0,6046	0,7958	0,9358	I	
9	0	0,0501	0,1614	0,3184	0,5	0,6815	0,8386	0,9499	I

Другой актуальной задачей ТФЭ является определение параметров уравнения состояния в жидкой фазе. В работе построен оптимальный план определения параметров уравнения состояния Кессельмана и соотр.:

$$Z = 1 - 1,744 \frac{\varepsilon_{ж}}{\kappa T} [(\delta_{ж} \cdot \varphi)^2 - 0,4654 (\delta_{ж} \cdot \varphi)^4], \quad (6)$$

$$\frac{\varepsilon_{ж}}{\kappa T} = 0,795 \cdot T_{к} \cdot e^{c(1-T/T_{к})}, \quad \delta_{ж}^{-3} = a - b \cdot T,$$

$$\delta_{ж} = 2\pi \cdot N \delta_{ж}^3 / 3.$$

Эта задача характеризуется существенной нелинейностью (все параметры входят в уравнение регрессии нелинейно), но малым числом параметров модели (a , b , и c).

В работе приведены результаты построения квази-оптимальных

планов и показано, что при минимальном опыте работы с уравнением состояния оказывается возможным заранее оценить значения искомых параметров для того, чтобы квазиоптимальные планы практически совпадали с оптимальными. На рис. 4 изображен спектр оптимального плана для уравнения состояния этана (6). На конкретном примере выборки из массива экспериментальных данных показано, что по трем опытным точкам, близким к точкам спектра плана, можно достаточно точно определить значения коэффициентов уравнения состояния. Надежность уравнения состояния с найденными таким образом параметрами продемонстрирована путем сравнения результатов расчета с остальными опытными данными. Подавляющее большинство опытных точек описывается с погрешностью, не превосходящей 0,2%, и лишь в четырех точках она достигает $0,3 + 0,4\%$.

Большое практическое значение имеет применение методики ПЭ к определению параметров обобщенных уравнений, используемых в автоматизированных системах расчета теплофизических свойств веществ.

В системе АВЕСТА базовым уравнением для расчета термических и калорических свойств широкого круга веществ служит уравнение Гиршфельдэра. Для этого уравнения построены оптимальные планы для описания двух областей: умеренного и плотного газа, в которых уравнение имеет различный вид. Показано, что "оптимизация" методики расчета плотности с применением методики ПЭ позволяет существенно повысить точность расчета свойств в системе АВЕСТА при минимальных затратах на проведение экспериментальных исследований.

Заключение.

1. Рассмотрены вопросы построения оптимальных планов проведения эксперимента по исследованию теплофизических свойств веществ. Выявлены основные особенности теплофизического эксперимента с точки зрения применения методов ПЭ. Сформулированы основные принципы выбора методики планирования в зависимости от вида регрессионной модели, экспериментального метода и области планирования.

2. Предложена методика последовательного планирования теплофизического эксперимента с оценкой степени возможной неадекватности используемой модели. Созданы универсальные программы построения D-оптимальных планов проведения эксперимента при наличии одного и двух контролируемых параметров и произвольного вида регрессионной модели и функции эффективности эксперимента, использующие методы нелинейного программирования и реализующие поиск экстремума опре-

делителя информационной матрицы безградиентными методами.

3. Решен ряд задач оптимального планирования теплофизического эксперимента с одним контролируемым фактором. Разработана методика определения параметров температурной зависимости второго виртуального коэффициента по экспериментальным $P - U - T$ данным, гарантирующая максимальную надежность выделяемых значений параметров при использовании минимального числа опытных точек. Разработаны оптимальные планы экспериментального исследования давления насыщенных паров чистого вещества для ряда математических моделей, описывающих кривую упругости. Методы ПЭ применены также к решению задачи оптимизации затрат на проведение некоторых градуировочных экспериментов. Приведены D -оптимальные планы решения ряда конкретных метрологических задач.

4. Предложенная методика и реализующая ее программа применены для построения оптимальных планов исследования термодинамической поверхности чистого вещества в газовой и жидкой фазах. Продемонстрирована эффективность предлагаемого подхода в случае ряда уравнений состояния. Найдены коэффициенты этих уравнений с использованием минимальной исходной информации и показано преимущество такого подхода.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Васильченко Л.Н. Методика планирования теплофизического эксперимента с учетом неадекватности уравнения состояния. - В кн.: Тез. стендовых докл. VII Всесоюз. конф., Ташкент, 1982, с.21.

2. Васильченко Л.Н. Учет неадекватности модели при планировании экспериментальных исследований термодинамических свойств индивидуальных веществ. - В кн.: Теплофизические свойства углеводородов и нефтепродуктов. М.: ЦНИИ ТЭнефтахим, 1983, с. 3-7.

3. Васильченко Л.Н. Построение D -оптимальных планов оптимального исследования комплекса теплофизических свойств на линии насыщения и в газовой области. - В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. "Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов", том 2, Харьков, 1983, с.49.

4. Васильченко Л.Г. Планирование эксперимента при измерениях изохорной теплоемкости. - В кн.: Тез. докл. второго Всесоюзного семинара по методам исследования изохорной теплоемкости в широкой области параметров состояния. Махачкала, 1982, с.11.

Васильченко

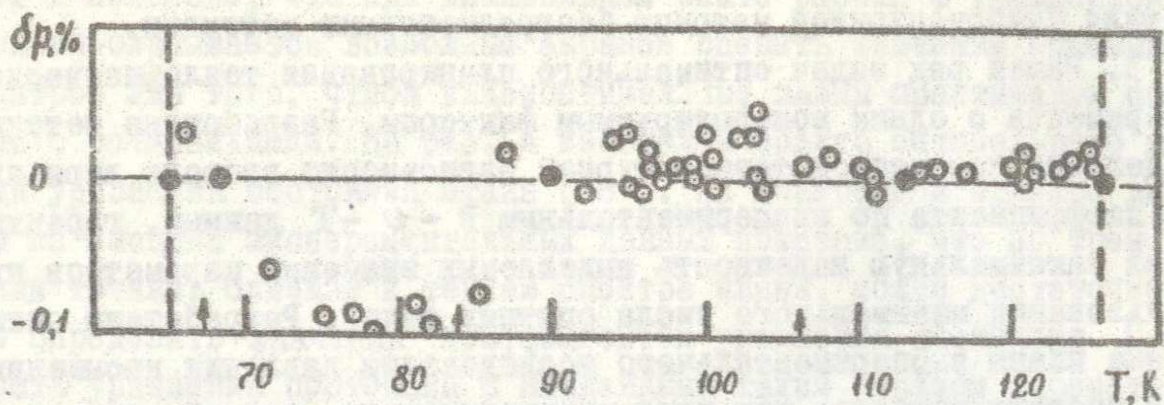


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных по давлению насыщенных паров азота с результатами расчета по уравнению Вагнера (1) в случае определения коэффициентов по оптимальному плану. \bullet - точки спектра плана, \uparrow - контрольные точки.

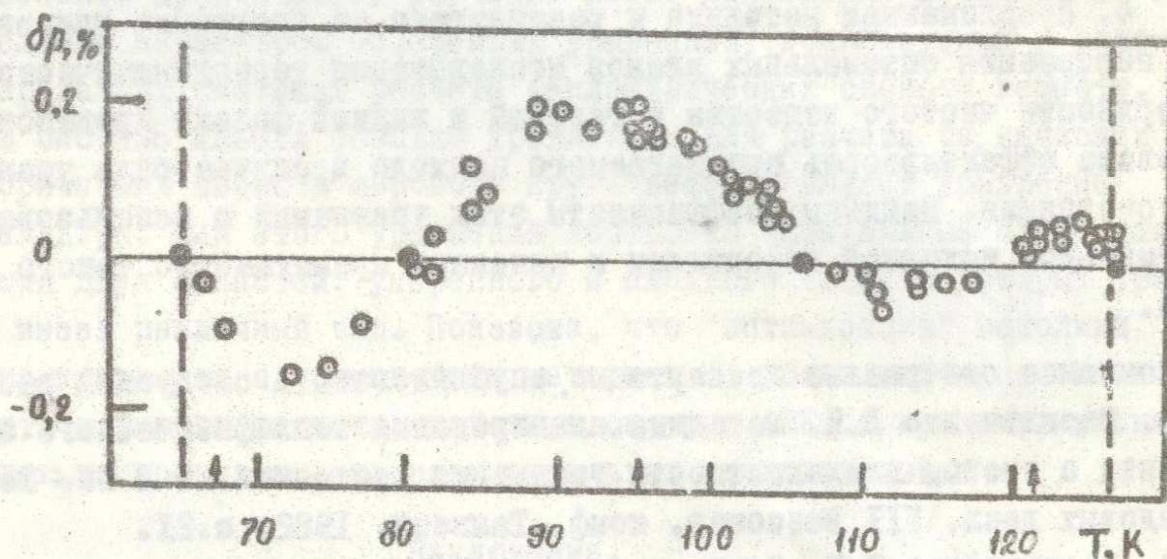


Рис. 2. То же для уравнения Зима-Тодосея (2).

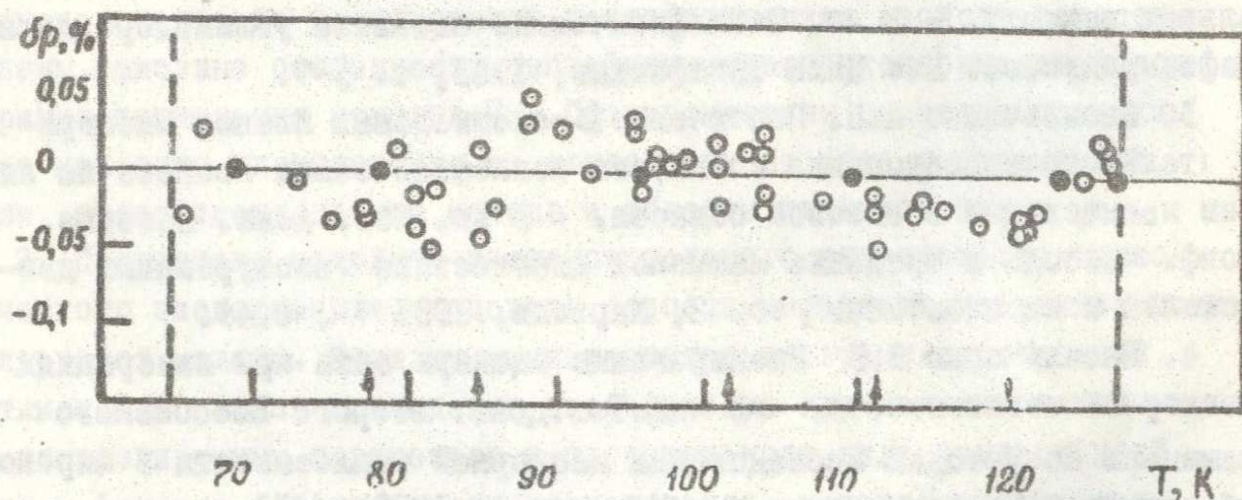


Рис. 3. То же для уравнения Коломийца (3).

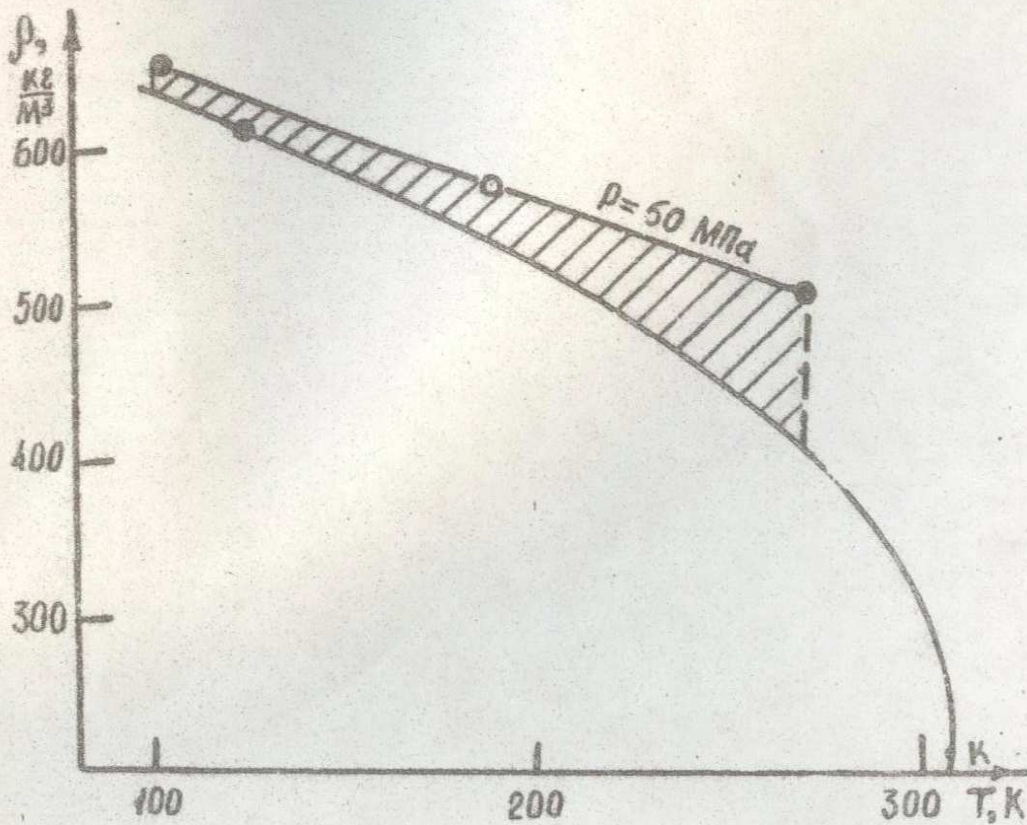


Рис. 4. Спектр оптимального плана p, v, T измерений для определения коэффициентов уравнения состояния /6/ жидкого этана.

● - точки спектра плана, ○ - контрольная точка, область планирования заштрихована.

√014779

~~с.в. 14749~~

Одесский технологический институт пищевой промышленности
Львовская область

БИБЛИОТЕКА