

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

А.Н. Токарева, Н.Н. Грачева, С.В. Панченко, М.С. Демченко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОФАКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Методические указания

Зерноград – 2021

© А.Н. Токарева, Н.Н. Грачева, С.В. Панченко,
М.С. Демченко
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2021

Об издании – [1](#), [2](#)
[Содержание](#)

УДК 62-69; 004

*Издается по решению методического совета энергетического факультета
Азово-Черноморского инженерного института
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде*

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент *Украинцев М.М.*

Использование метода многофакторной оптимизации для определения рациональных параметров теплоэнергетических установок [Электронный ресурс]: методические указания/ А.Н. Токарева, Н.Н. Грачева, С.В. Панченко, М.С. Демченко. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2021. – 28 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

В указании приведена методика планирования многофакторного эксперимента и даны примеры ее использования с обработкой результатов для теплоэнергетических установок.

Методические указания предназначены для выполнения разделов курсового проектирования по дисциплине «Оптимизация параметров теплоэнергетических установок» и для самостоятельного изучения материалов по дисциплине «История и методология науки (на примере теплоэнергетики и теплотехники) для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Теплоэнергетика и техносферная безопасность».

Протокол № 11 от 19 апреля 2021 г.

Рассмотрено и одобрено методическим советом энергетического факультета
Протокол № 4 от 27 апреля 2021 г.

Содержание

	Стр.
<u>Введение</u>	4
1. <u>Краткая теория многофакторного эксперимента</u>	4
2. <u>Примеры определения рациональных параметров энергетических установок при помощи машинного многофакторного эксперимента</u>	11
2.1. <u>Определение оптимального типа котельных установок в системе децентрализованного теплоснабжения</u>	11
2.2. <u>Обоснование оптимальной схемы расположения инфракрасных излучателей</u>	17
<u>Список рекомендуемой литературы</u>	27

Введение

Оптимизация – это выбор наилучшего решения из всех возможных. Выбор наилучшего варианта технической системы осуществляется путем вариации независимых параметров системы на основании некоторого критерия эффективности.

Независимые параметры системы, влияющие на эффективность работы системы, называются *оптимизируемыми* (или *управляемыми*) параметрами.

В процессе оптимизации требуется найти *оптимальные* значения оптимизируемых параметров. Оптимальные параметры соответствуют наиболее эффективной работе системы.

Число оптимизируемых параметров характеризует *размерность* задачи оптимизации. В зависимости от числа оптимизируемых параметров задачи и методы оптимизации делятся на *однофакторные* ($n = 1$) и *многофакторные* ($n \geq 2$).

1. Краткая теория многофакторного эксперимента

Многофакторный эксперимент широко используется в современной научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований.

Планированием многофакторного эксперимента называется процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Все факторы, формирующие процесс экспериментальных исследований изменяются одновременно по определенным зависимостям, а конечным результатом проведения многофакторного эксперимента будет математическая модель исследуемой функции.

При составлении плана эксперимента прежде всего назначают (выбирают) независимые факторы, исходя из априорной (доопытной) информации или предварительного изучения объекта исследования.

Далее при составлении плана эксперимента назначаются уровни варьирования факторами, или градации. При качественных факторах их можно условно пронумеровать (закодировать). Допустим, подача материала в машину самотеком – уровень 0, а принудительно – 1.

В многофакторных экспериментах, основанных на дисперсионном анализе, обычно берут два уровня факторов (верхний и нижний). Ведь в таких экспериментах важно проверить, значимо ли влияет тот или иной фактор и есть ли факторные взаимодействия. Варьирование переменными на двух уровнях позволяет значительно уменьшить объем экспериментальной и счетной работы.

В многофакторном эксперименте уровни одного фактора должны сочетаться с уровнями другого, образуя тем самым вариант испытаний. Интервал варьирования того или иного фактора должен быть таким, чтобы можно было реализовать любой вариант испытаний.

В теории планирования эксперимента условно принято обозначать нижнюю границу или нижний уровень фактора знаком $-$, верхнюю $+$. Основной уровень варьирования обозначается 0.

В теории планирования эксперимента, если факторы устанавливаются на двух уровнях, принято обозначать – эксперимент типа 2^n , где n – число факторов. Если факторы устанавливаются на трех уровнях, то называют эксперимент типа 3^n и т.д.

Комбинации условий эксперимента 2^2 можно выразить в виде таблицы, если обозначить нижний уровень фактора $-$, а верхний $+$. Такая таблица называется матрицей планирования эксперимента (табл. 1-4).

Обозначим наблюдаемый отклик через y , а факторы — через x_1, x_2, \dots, x_k .

Таблица 1. Матрица планирования двухфакторного эксперимента на двух уровнях

№ опыта	Факторы	
	X ₁	X ₂
1	+	+
2	+	–
3	–	+
4	–	–

Таблица 2. Матрица планирования двухфакторного эксперимента на трех уровнях

№ опыта	Факторы	
	X ₁	X ₂
1	–	–
2	–	0
3	–	+
4	0	–
5	0	0
6	0	+
7	+	–
8	+	0
9	+	+

Таблица 3. Матрица планирования трехфакторного эксперимента на двух уровнях

№ опыта	Факторы		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	–	–
2	–	–	–
3	+	+	–
4	–	+	–
5	+	–	+
6	–	–	+
7	+	+	+
8	–	+	+

При планировании двухфакторного эксперимента и предполагаемой линейной модели уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

Где $b_0...b_{12}$ – коэффициенты регрессии

Если анализ результатов показывает, что линейная модель, соответствующая полиному 1-го порядка, не адекватна исследуемому процессу, то переходят к планированию и проведению следующего эксперимента исходя из предложения, что математическая модель соответствует полиному следующего порядка и т.д

Для двухфакторного эксперимента с предполагаемой нелинейной моделью, уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (2)$$

Если в эксперименте используется три фактора ($k = 3$), а предполагаемая модель линейна, то она соответствует полиному вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3)$$

При планировании трехфакторного эксперимента, основанного на модели 2-го порядка уравнение регрессии приобретает вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (4)$$

После построения математической модели проводится *статистический анализ*.

При статистическом анализе проверяется значимость коэффициентов регрессии и адекватность линейной модели. Под *адекватностью* понимается соответствие модели экспериментальным данным по выбранному критерию. Значимость коэффициентов регрессии проверяется по критерию Стьюдента. Проверка гипотезы об адекватности модели основана на расчетах дисперсии критерия Фишера. Расчет всех этих критериев приводится в специальной литературе/1-4/.

В настоящее время обработка результатов эксперимента проводится при помощи модуля Experimental Desing программы Statistica. Данный модуль позволяет определить значимость коэффициентов регрессии и сразу же отбросить незначимые составляющие полиномов (1-4). Также при использовании данного программного продукта рассчитывается коэффициент аппроксимации полученной математической модели.

Для оптимизируемых параметров уравнение $Y = F(X)$ определяет в $(n + 1)$ -мерном пространстве E_{n+1} некоторую *гиперповерхность или поверхность отклика*. Когда $n = 2$, это – обычная поверхность в трехмерном пространстве $Y(x_1, x_2)$ (см. рис. 1). При этом для каждого постоянного C множества значений функции $F(x_1, x_2)$ уравнение $F(x_1, x_2) = C$ неявно задает кривую в координатах (x_1, x_2) на плоскости $Y = C$. На рис. 2 показано пересечение поверхности функции двумя такими плоскостями: $Y = F_1$ и $Y = F_2$.

Если несколько таких кривых, соответствующих некоторой выборке значений параметра $C(F_1, F_2, \dots)$, изобразить на одной плоскости, получится контурный график функции. Образующие его кривые $F_1 = \text{const}$, $F_2 = \text{const}$ принято называть *линиями уровня* (см. рис.2)

При числе факторов $n \leq 3$ о функции отклика можно получить наглядное геометрическое представление. В случае двух независимых переменных, придавая различные фиксированные значения Y получим кривых равного выхода изолиний на плоскости (рис. 3).

Все поверхности второго порядка подразделяются на три класса:

1) поверхности, имеющие экстремум–максимум или минимум (рис 3 б и в). В этом случае все коэффициенты регрессии (1-4) имеют одинаковые знаки и центр фигуры находится вблизи эксперимента;

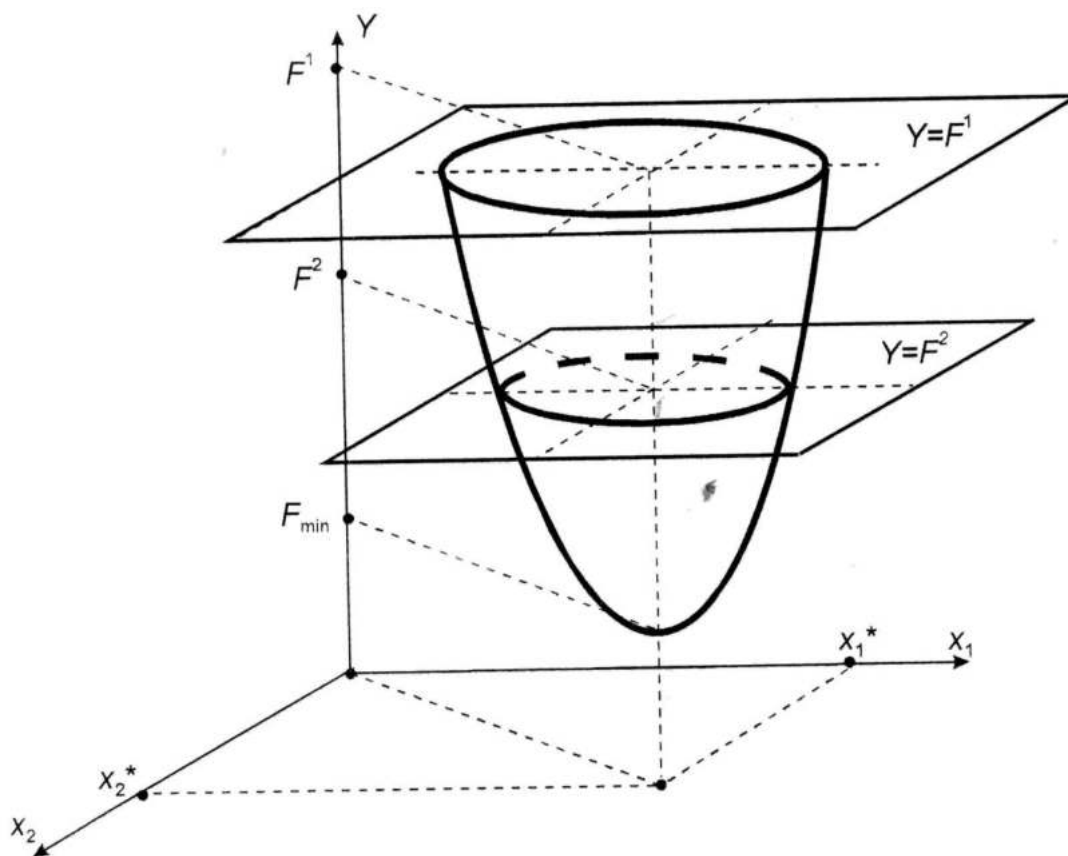


Рисунок 1 –Поверхность отклика целевой функции двух переменных
 $Y = F(x_1, x_2)$

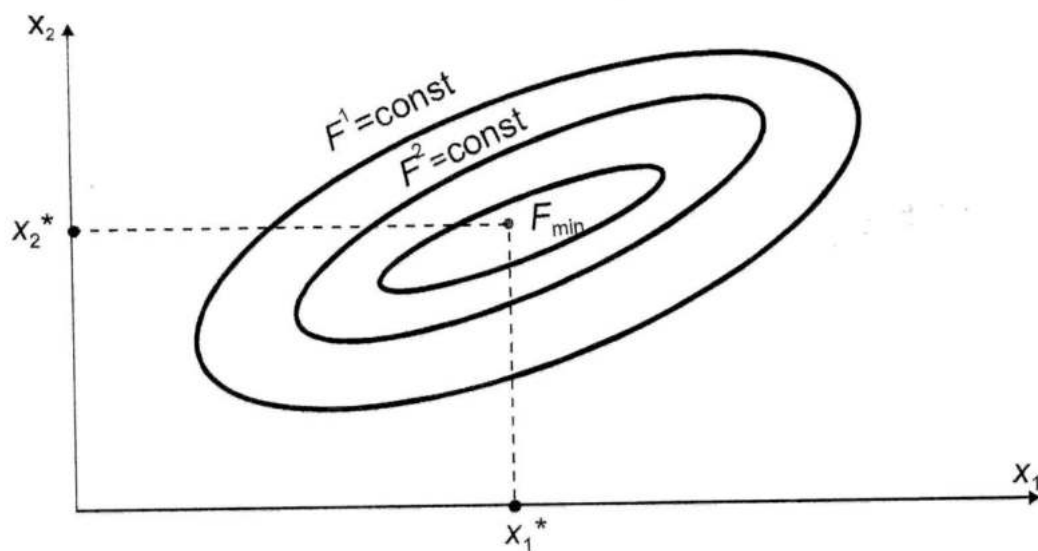
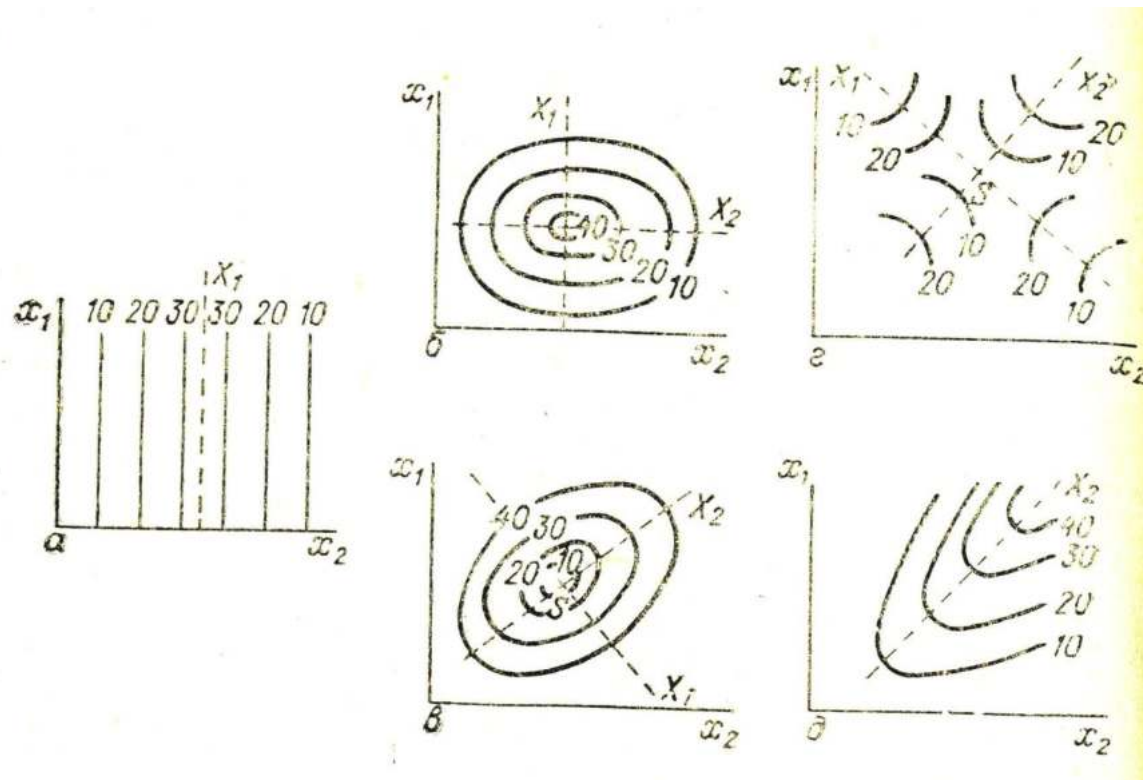


Рисунок 2 –Линии уровня целевой функции (контурный график) двух переменных $Y = F(x_1, x_2)$



а – параллельные плоскости; б–холм; в–впадина; г–седловина; д–
возвышающийся гребень

Рисунок 3–Проекция поверхностей отклика на плоскость (контурные
графики целевых функций)

- 2) поверхности типа минимакса (рис. 3 г) – коэффициенты регрессии имеют разные знаки, центр фигуры находится вблизи эксперимента;
- 3) поверхности типа возвышающегося гребня (рис. 3д) – в этом случае один из коэффициентов регрессии близок к нулю и центр фигуры удален в бесконечность;
- 4) в случае если один из коэффициентов регрессии будет равен нулю, то поверхность называется стационарным возвышением (рис. 3а) В данном случае критерием оптимизации и центром может быть любая точка на оси, соответствующая нулевому значению коэффициента регрессии.

2. Примеры определения рациональных параметров энергетических установок при помощи машинного многофакторного эксперимента

2.1. Определение оптимального типа котельных установок в системе децентрализованного теплоснабжения

Задача. Определить какой из двух типов котлов – высокотемпературный или конденсатный – наиболее эффективен при использовании его в системе децентрализованного теплоснабжения школьного комплекса, величины нагрузок которого представлены в таблице 4. За критерий оптимизации принять чистый дисконтированный доход.

Таблица 4. Характеристика тепловых нагрузок

Месторасположение объекта теплоснабжения	Суммарная тепловая нагрузка на отопление и вентиляцию $\Phi_{от,в}$ $Вт$	Нагрузка на горячее водоснабжение	
		В холодный период года	В теплый период года
Район Кавказских минеральных вод, г. Пятигорск	605,81	888	146
Ростовская область	640,91		
Московская область	676,01		

Значения тепловых нагрузок были выбраны для реализации двухфакторного машинного эксперимента при варьировании факторов на трех уровнях значимости. Интервалы варьирования определялись значениями тепловых нагрузок, представленными в таблице 4. Нижний уровень варьирования первого фактора – суммарной тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию – соответствовал условиям района Кавказских Минеральных вод города Пятигорска, средний – Ростовской области, верхний – Московской области.

Второй фактор – это тепловая нагрузка на горячее водоснабжение. Верхний уровень данного фактора соответствовал значению тепловой мощности в холодный период года, нижний – в теплый период года.

Нулевой уровень определен как среднеарифметическое значение максимальной и минимальной тепловой мощности системы ГВС.

Для всех строк стандартной матрицы трехфакторного эксперимента был определен расход топлива для обоих типов котлов при помощи графо-аналитического метода и определена экономия газа при использовании конденсационной техники.

По традиционной методике был выполнен расчет чистого дисконтированного дохода при использовании конденсатных и высокотемпературных котлов. Рассчитанные тепловые нагрузки позволили определить источники теплоснабжения, перечень которых представлен в таблице 5. При определении экономической эффективности в базовом варианте рассматривалась система централизованного теплоснабжения.

Результаты выполненных расчетов количества используемого топлива и чистого дисконтированного дохода представлены в таблице 4.

Таблица 5. Перечень теплоэнергетического оборудования для определения экономической эффективности

Регион	Нагрузка на ГВС	Вариант с использованием высокотемпературных котлов		Вариант с использованием конденсационных котлов	
		Тип котла	Кол-во	Тип котла	Кол-во
1	2	3	4	5	6
Район Кавказских минеральных вод, г. Пятигорск (-)	Минимальная(-)	RS-A150	1	GB312-160	1
		RS-A300	2	GB402-320-5	2
	Средняя(0)	RS-A300	4	GB402-320-5	4
	Максимальная(+)	RS-A300	5	GB402-320-5	5
Ростовская область(0)	Минимальная(-)	RS-A150	1	GB312-160	1
		RS-A300	2	GB402-320-5	2
	Средняя(0)	RS-A300	4	GB402-320-5	4
	Максимальная(+)	RS-A300	5	GB402-320-5	5

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6
Московская область(+)	Минимальная(-)	RS-A150	1	GB312-160	1
		RS-A300	2	GB402-320-5	2
	Средняя(0)	RS-A300	4	GB402-320-5	4
	Максимальная(+)	RS-A300	5	GB402-320-5	5

Таблица 6. Результаты реализации двухфакторного машинного эксперимента при использовании высокотемпературных и конденсатных котлов в системе децентрализованного теплоснабжения.

№ строки матрицы	$\Phi_{\text{сум}}$	$\Phi_{\text{ГВС}}$	Экономия расхода газа при использовании конденсатного котла ΔB , м ³	Чистый дисконтированный доход, тыс.руб	
				Конденсатный котел	Высокотемпературный котел
1	605,81(-)	146(-)	19271	6 394	11 457
2	605,81(-)	517(0)	50267	21 964	27 818
3	605,81(-)	888(+)	16086	59 128	56 482
4	640,91(0)	146(-)	20364	7 399	12 329
5	640,91(0)	517(0)	49151	22 866	27 628
6	640,91(0)	888(+)	76844	58 131	57 748
7	676,01(+)	146(-)	19289	19 839	23 038
8	676,01(+)	517(0)	49031	45 302	30 371
9	676,01(+)	888(+)	77574	69 340	69 751

Полученные числовые массивы были обработаны с помощью программы «Statistica. Experimental Design». В результате обработки получили искомую зависимость, графическая интерпретация которой представлена на рисунке 4.

Поверхность отклика экономии газа представляет собой «возвышающийся гребень», соответствующий следующей целевой функции:

$$\Delta B = -128,87\Phi_{\text{сум}} + 0,235\Phi_{\text{сум}}^2 + 0,014\Phi_{\text{ГВС}}^2 \quad (5)$$

Поверхность отклика экономии газа представляет собой «возвышающийся гребень», соответствующий следующей целевой функции:

$$\Delta B = -128,87\Phi_{\text{сум}} + 0,235\Phi_{\text{сум}}^2 + 0,014\Phi_{\text{ГВС}}^2 \quad (6)$$

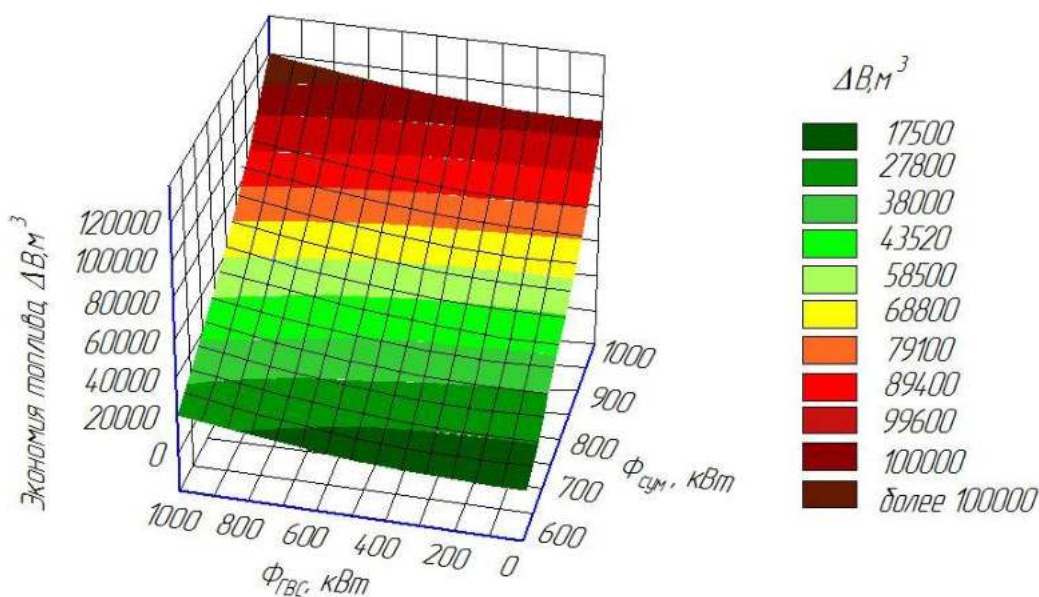


Рисунок 4 – Поверхность отклика зависимости экономии топлива (ΔB) от тепловых нагрузок на отопление ($\Phi_{\text{сум}}$) и горячее водоснабжение ($\Phi_{\text{ГВС}}$)

Адекватность полученной модели была проверена при помощи критерия Фишера, который подтвердил наличие тесной связи между параметрами полученной зависимости. Таким образом, снижение расхода газа при использовании конденсатного котла увеличивается с увеличением квадратов тепловых нагрузок.

Однако как было упомянуто ранее, экономия энергетических ресурсов не всегда обеспечивает эффективность использования конденсатных котлов. Для окончательной оценки был проведен анализ приведенных на рисунках 5 и 6 графических зависимостей, полученных также в результате обработки данных таблицы 3.

Зависимость изменения чистого дисконтированного дохода при использовании конденсатного котла описывается полиномом первой степени

$$\text{ЧДД}_k = -144060000 + 223149\Phi_{\text{сум}} + 68718\Phi_{\text{ГВС}} \quad (7)$$

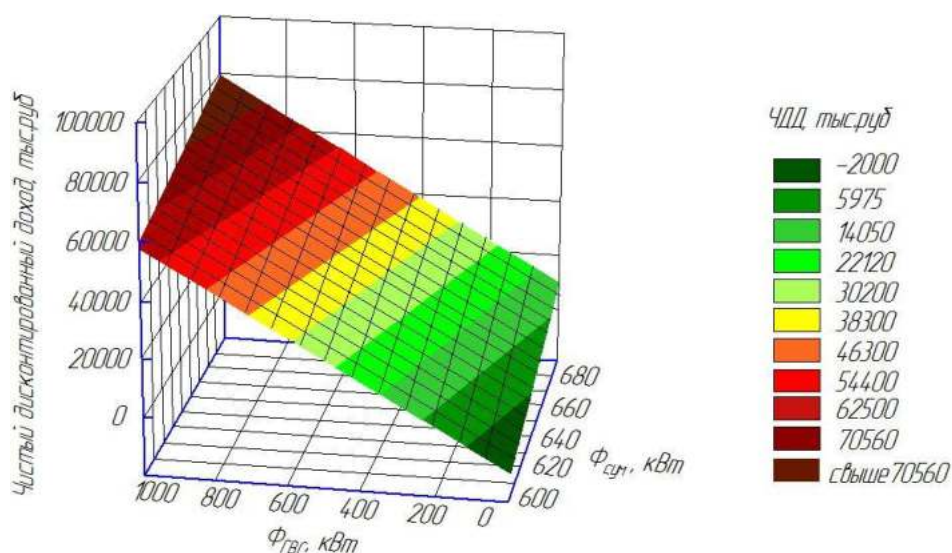


Рисунок 5 – Поверхность отклика зависимости чистого дисконтированного дохода (ЧДД) от тепловых нагрузок на отопление ($\Phi_{\text{отп}}$) и горячее водоснабжение ($\Phi_{\text{ГВС}}$) при использовании конденсатного котла.

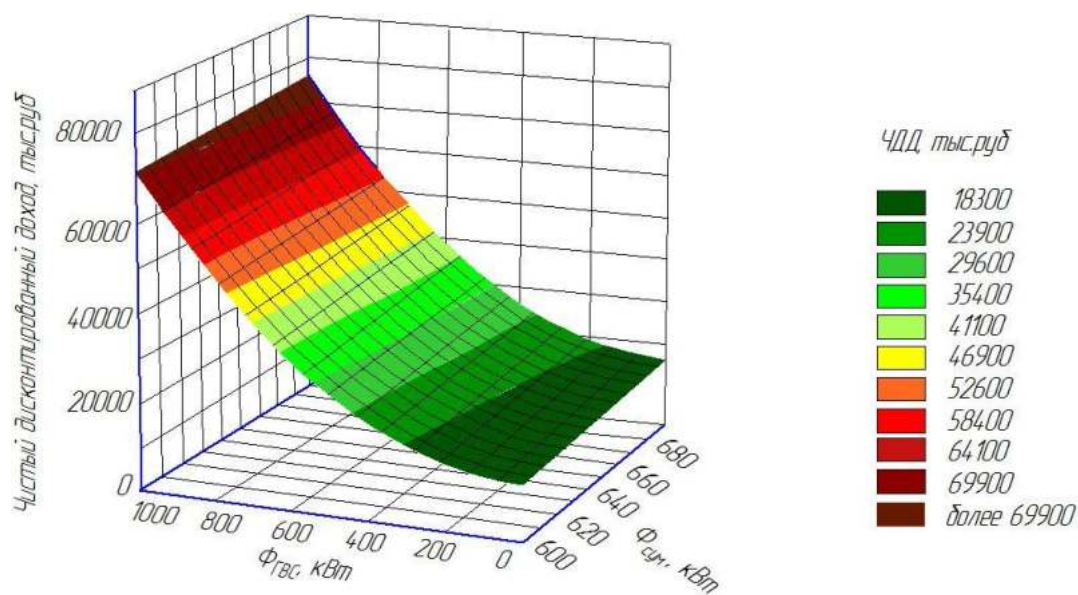


Рисунок 6– Поверхность отклика зависимости чистого дисконтированного дохода (ЧДД) от тепловых нагрузок на отопление ($\Phi_{\text{отп}}$) и горячее водоснабжение ($\Phi_{\text{ГВС}}$) при использовании высокотемпературного котла

Графическая интерпретация данной модели представляет собой стационарное возвышение. Таким образом, увеличение ЧДД при использовании конденсатной техники находится в линейной зависимости от значений тепловых нагрузок.

Что же касается изменения динамического показателя при использовании высокотемпературного котла, то поверхность отклика (рис.3) представляет собой возвышающийся гребень и описывается полиномом второй степени

$$\text{ЧДД}_{\text{от}} = 34,393\Phi_{\text{сум}}^2 + 59,267\Phi_{\text{ГВС}}^2 \quad (8)$$

Как видно из представленных графических зависимостей, использование конденсатных котлов эффективно при нагрузке на горячее водоснабжение, превышающей нагрузку на отопление. Если постоянная нагрузка на ГВС значительно ниже максимальной нагрузки на отопление, то наиболее целесообразно использовать в качестве источников теплоснабжения высокотемпературные котлы.

Выводы Использование системы децентрализованного теплоснабжения для энергообеспечения школьного комплекса дает значительный экономический эффект, что особенно важно для бюджетных предприятий.

В качестве источников теплоснабжения в системах рекомендуется использовать высокотемпературные котлы для объектов с незначительной величиной тепловой нагрузки на ГВС. Для таких объектов, как больницы, детские сады, производственные предприятия с большим расходом энергоносителя на технологические нужды для покрытия тепловых нагрузок необходимо устанавливать в котельных конденсационную технику.

2.2. Обоснование оптимальной схемы расположения инфракрасных излучателей

Задача. Определить оптимальную схему расположения инфракрасных излучателей мощностью по 2,9кВт и 5кВт в помещении ремонтного цеха размерами 48,5х11,5х7,9м. Тепловая нагрузка системы инфракрасного излучения составляет 194 кВт.

Для всех принятых типоразмеров горелок определили схемы расстановки излучателей по условиям неравномерности облучения:

$$\frac{A}{H} \leq 1 \quad (9)$$

$$\frac{B}{H} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{H^2}{F} \leq 0,1 \quad (11)$$

где A — расстояние между центрами (шаг) горелок в ряду, м;

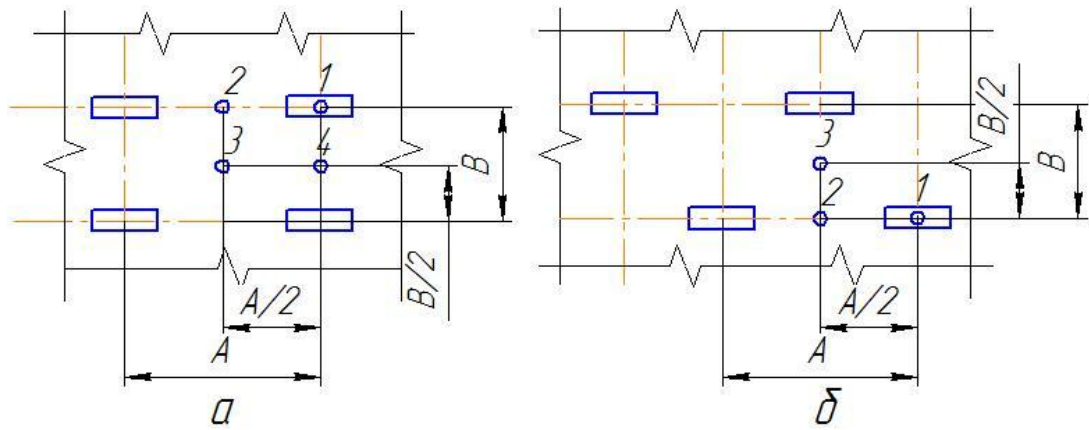
B — расстояние между центрами рядов горелок, м;

H — расстояние от пола до горелок (высота подвеса), м;

F — отапливаемая площадь пола и стен, м².

Минимальную высоту подвеса приняли равной $H_{min}=4м$. Это наименьшая высота, при которой рекомендуются использовать «светлые» инфракрасные излучатели. Максимальную высоту подвеса приняли равной $H_{max}=7м$ с учетом высоты помещения и удобства монтажа отопительных приборов. Средняя высота подвеса составила соответственно $H_{cp}=5,5м$.

При проведении расчетов были рассмотрены варианты расположения излучателей в коридорном и шахматном порядке. Схемы расположения излучателей с нанесением характерных точек, в которых облученность будет максимальной, представлены на рисунке 7.



а – коридорное расположение излучателей; б – шахматное расположение излучателей

Рисунок 7 – Схема расположения характерных точек для расчета облученности

По результатам вычислений выражений (9-11) получилось больше десяти возможных вариантов расположения нагревательных приборов для каждого типоразмера в зависимости от числа рядов и высоты подвеса. Поэтому при определении рационального варианта расположения для излучателей данной мощности воспользовались методом многомерной минимизации. За первый фактор приняли число возможных рядов n (x_1), за второй фактор – высоту подвеса H (x_2).

Облученность в характерных точках определяли следующим образом для коридорного расположения излучателей:

$$q_1 = \frac{1,8(H-h)^2 \cdot F_{\text{зид}}}{(H-h)^4} \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - 92 \right) \quad (12)$$

$$q_2 = \frac{2 \cdot 1,8(H-h)^2 \cdot F_{\text{зид}}}{\left(\left(\frac{A}{2} \right)^2 + (H-h)^2 \right)^2} \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - 92 \right) \quad (13)$$

$$q_3 = \frac{4 \cdot 1,8(H-h)^2 \cdot F_{\text{зид}}}{\left(\left(\frac{A}{2} \right)^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 + (H-h)^2 \right)^2} \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - 92 \right) \quad (14)$$

$$q_4 = \frac{2 \cdot 1,8(H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{\left(\left(\frac{B}{2}\right)^2 + (H-h)^2\right)^2} \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100}\right)^4 - 92\right) \quad (15)$$

Для шахматного расположения излучателей:

$$q_1 = \frac{1,8(H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{(H-h)^4} \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100}\right)^4 - 92\right) \quad (16)$$

$$q_2 = \left(\frac{2 \cdot 1,8 \cdot (H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{\left(\left(\frac{A}{2}\right)^2 + (H-h)^2\right)^2} + \frac{1,8(H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{(B^2 + (H-h)^2)^2} \right) \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100}\right)^4 - 92\right) \quad (17)$$

$$q_3 = \left(\frac{2 \cdot 1,8 \cdot (H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{\left(\left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 + (H-h)^2\right)^2} + \frac{1,8(H-h)^2 \cdot F_{zuu}}{\left(\left(\frac{B}{2}\right)^2 + (H-h)^2\right)^2} \right) \cdot \left(\left(\frac{273+t_1}{100}\right)^4 - 92\right) \quad (18)$$

где h —высота человека, м

Уровни варьирования факторов определили следующим образом. Для горелок мощностью 5кВт , число рядов горелок варьируются в пределах от 3 до 6. Таким образом нижний уровень варьирования фактора $x_1=3$, верхний уровень $x_1=5$. Средний уровень принимаем равным $x_1=4$. Высоту подвеса для возможных вариантов расположения изменяется в пределах от 5,5м до 7м. Следовательно высота подвеса для нижнего уровня составит $x_2=5,5$, для верхнего уровня $x_2=7$, а средний уровень численно равен $x_2=6,75$.

. В окончательном варианте результаты реализации двухфакторного машинного эксперимента для горелок мощностью 5кВт представлены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты реализации многофакторного эксперимента для горелок мощностью 5кВт

N=5кВт	Число рядов горелок n	Высота подвеса h , м	Коридорное расположение	Шахматное расположение	
			Облученность в характерных точках $\frac{Вт}{м^2}$	Облученность в характерных точках $\frac{Вт}{м^2}$	
№ строки матрицы	x_1	x_2	q_4	q_2	q_3
1	3(-)	5,5(-)	114,76	120,48	104,58
2	3(-)	6,25(0)	90,89	94,41	84,82
3	3(-)	7(+)	72,56	74,90	68,81
4	4(0)	5,5(-)	139,56	92,32	116,77
5	4(0)	6,25(0)	104,86	78,03	92,07
6	4(0)	7(+)	80,86	65,33	73,28
7	5(+)	5,5(-)	153,84	71,55	115,74
8	5(+)	6,25(0)	112,44	65,24	91,47
9	5(+)	7(+)	85,20	57,82	72,91

Обработка полученных данных проводилась при помощи модуля Experimental Design программы Statistica.

Уравнение регрессии облученности в точке 4 для коридорного расположения горелок мощностью 5 кВт имеет вид

$$q_4 = 302,2 + 11,12n + 38,34H \quad (19)$$

Изменение облученности в точке 2 при шахматном расположении горелок мощностью 5кВт описывается следующим выражением:

$$q_2 = 537,68 - 84,13n - 62,81H + 10,87nH \quad (20)$$

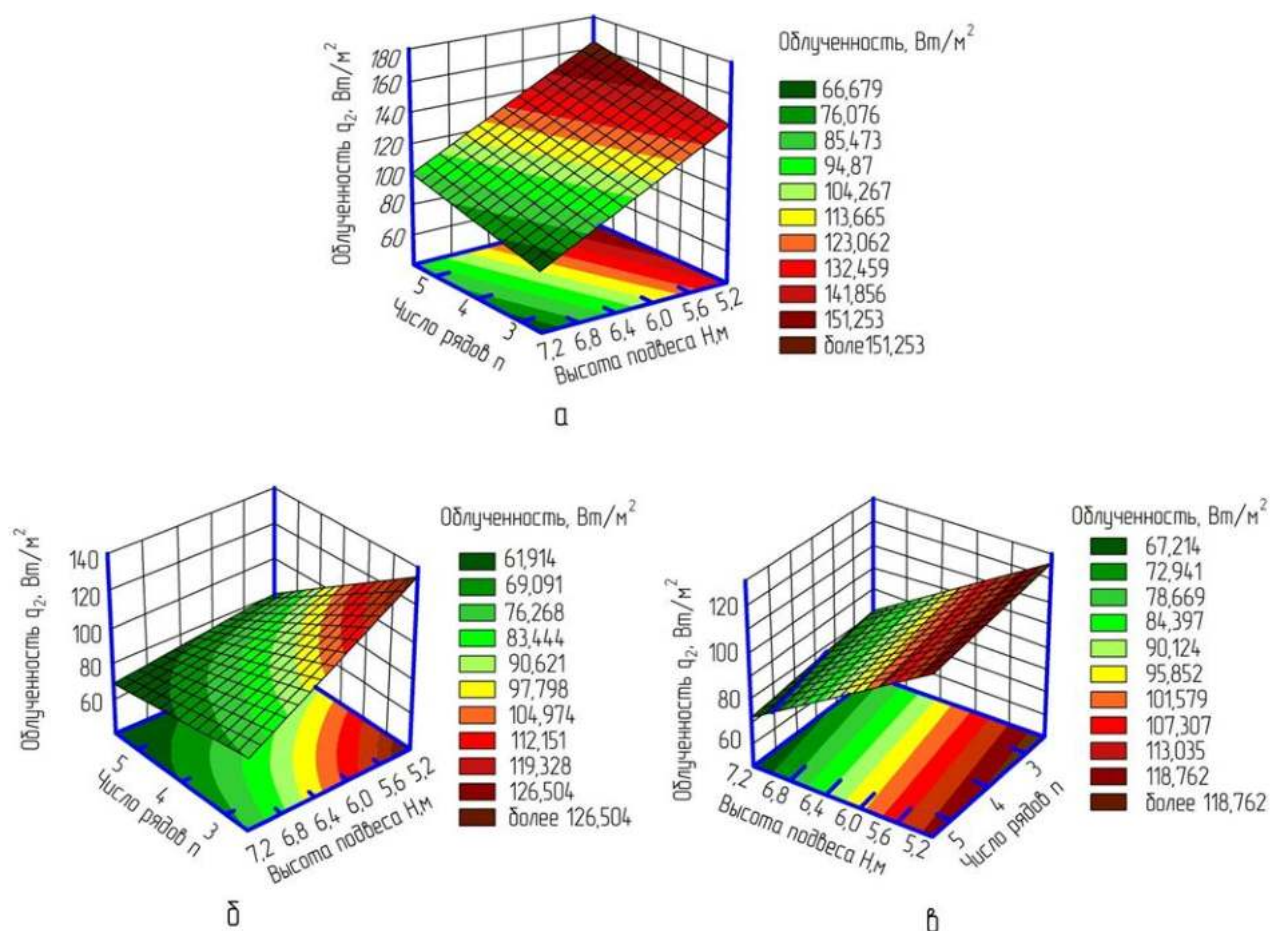
Зависимость облученности в точке 3 от числа рядов n и высоты подвеса H представлена формулой:

$$q_3 = 250,03 + 3,35n - 27,49H \quad (21)$$

Графическая интерпретация полученных моделей (19-21) показана на рисунке 8.

Все поверхности отклика на рис.8 представляют собой «возвышающиеся гребни», не имеющие экстремума. Минимальная

облученность при коридорном расположении инфракрасных излучателей обеспечивается при минимальном числе рядов и максимальной высоте подвеса. При этом значение облученности ниже допустимого значения. При шахматном расположении минимальная облученность в точке 3 получается также при минимальном числе рядов и максимальной высоте подвеса. А вот наименьшего значения облученность в точке 3 достигает при максимальной высоте подвеса и максимальном числе рядов. При таком сочетании факторов облученность в точке 2 принимает значение, превышающее нормативное.



а – облученность в точке 4 при коридорном расположении горелок; б – облученность в точке 2 при шахматном расположении горелок; в – облученность в точке 3 при шахматном расположении горелок

Рисунок 8– Поверхности отклика изменения облученности в характерных точках при использовании инфракрасных излучателей мощностью 5кВт.

Следовательно, использовать схему с шахматным расположением горелок мощностью 5кВт также не имеет смысла. Единственным рациональным вариантом расположения горелок является вариант коридорного исполнения с минимальным числом рядов и максимально возможной высотой подвеса.

Для горелок мощностью 2,9кВт общий диапазон варьирования количество рядов составляет от 3 до 8. Таким образом нижний уровень варьирования фактора $x_1=3$, верхний уровень $x_1=8$. Средний уровень принимаем равным $x_1=5$. Высоту подвеса принимаем такой же, как и при использовании горелок мощностью 5кВт. Изменение облученности при шахматном расположении горелок мощностью 2,9кВт имеет такой же характер, как при применении горелок мощностью 5 кВт. Что же касается облученности в точках 2 и 4 при коридорном расположении излучателей, то максимальная облученность в точке 2 достигается при минимальном количестве рядов, а в точке 4 – при максимальном количестве рядов. Поэтому в матрице реализации многофакторного эксперимента для излучателей мощностью 2,9кВт (табл.8) определена облученность в точках 2 и 4 для коридорного расположения излучателей и в точках 2 и 3 для шахматного расположения излучателей.

Таблица 8. Результаты реализации многофакторного эксперимента для горелок мощностью 2,9кВт

№ строки матрицы	Число рядов	Высота подвеса, м	Коридорное расположение		Шахматное расположение	
			Облученность, $\frac{Вт}{м^2}$		Облученность, $\frac{Вт}{м^2}$	
			q_2	q_4	q_2	q_3
1	3(-)	5,5(-)	129,35	94,50	157,36	110,96
2	3(-)	6,25(0)	93,97	74,85	114,47	88,66
3	3(-)	7(+)	70,93	59,75	86,56	71,19
4	5(0)	5,5(-)	99,36	126,70	125,86	138,35
5	5(0)	6,25(0)	77,67	92,59	99,79	104,21
6	5(0)	7(+)	61,46	70,16	80,20	80,48
7	8(+)	5,5(-)	58,69	141,60	102,29	130,59
8	8(+)	6,25(0)	52,07	83,51	90,78	99,93
9	8(+)	7(+)	45,01	74,36	79,02	77,98

Уравнения регрессии для схем с использованием горелок мощностью 2,9кВт имеют вид:

изменение облученности в точке 2 для коридорного расположения излучателей:

$$q_2 = 485,27 - 47,45n - 57,24H + 6,08 \quad (22)$$

изменение облученности в точке 4 для коридорного расположения излучателей:

$$q_4 = 291,15 + 5,07n - 35,91H \quad (23)$$

изменение облученности в точке 2 для шахматного расположения излучателей:

$$q_2 = 571,75 - 56,3n + 0,92n^2 - 65,74H + 6,42nH \quad (24)$$

изменение облученности в точке 3 для шахматного расположения излучателей:

$$q_3 = 251,82 + 23n - 1,88n^2 - 33,92H \quad (25)$$

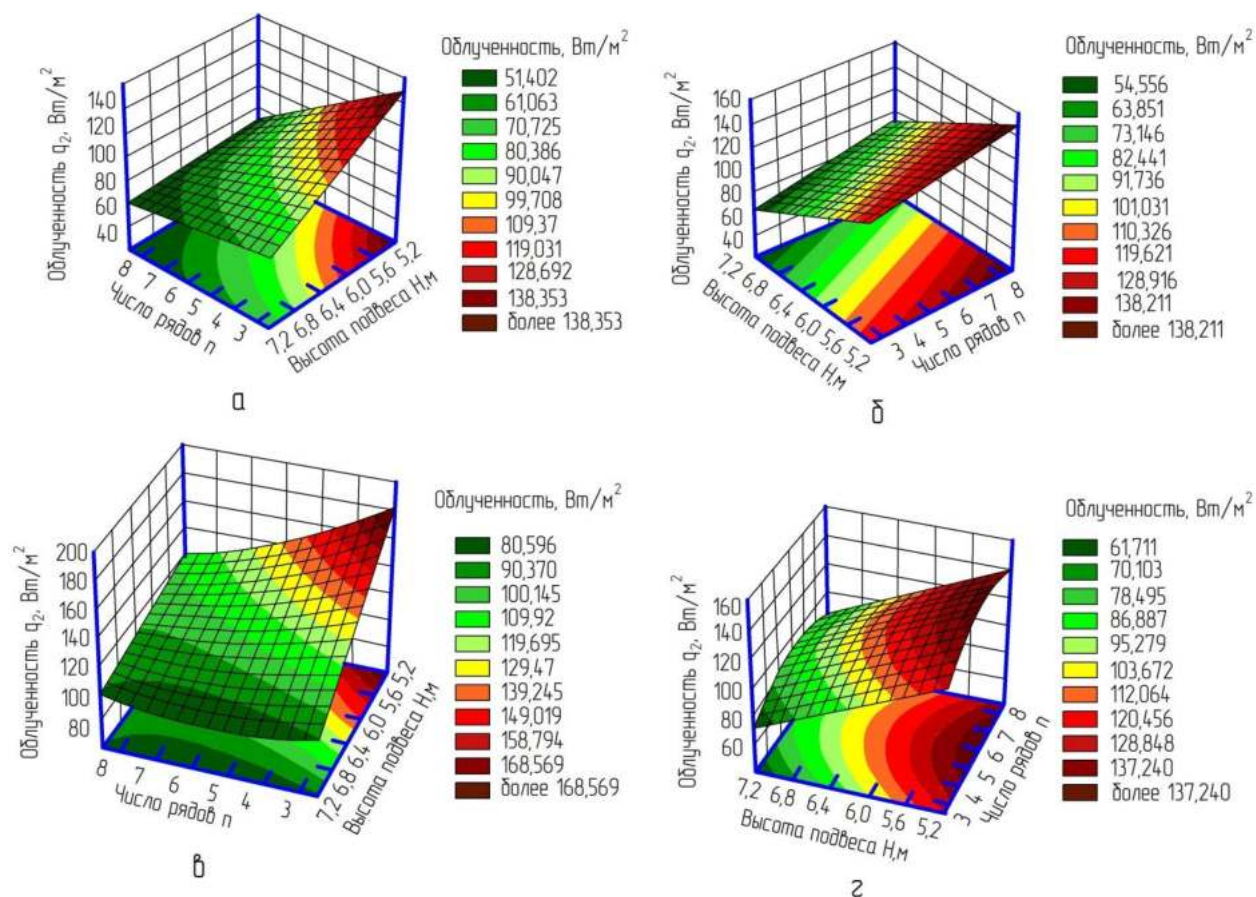
В результате обработки данных было установлено:

- коэффициенты уравнения регрессии значимы по критерию Стьюдента на 5% уровне;
- значения коэффициента детерминации $R^2 > 0,9$, следовательно, значения отклика объяснимы значениями факторов, регрессионная модель может использоваться для прогноза;
- сравнение табличных значений критерия Фишера с расчетными значениями показали, что между откликом и факторов существует зависимость.

Изображение поверхностей откликов зависимостей (22-25) представлено на рисунке 9.

Поверхность отклика облученности в точке 2 для коридорного расположения излучателей (рис.9а) представляет собой «возвышающийся гребень». Допустимое значение облученности получается при использовании варианта с максимальным числом рядов и максимальной

высотой подвеса. Однако так же следует отметить тот факт, что при максимальном числе рядов значение облученности находится в допустимых пределах при любой высоте подвеса в рассматриваемом диапазоне.



а – облученность в точке 2 при коридорном расположении горелок; б – облученность в точке 4 при коридорном расположении горелок; в – облученность в точке 2 при шахматном расположении горелок; г – облученность в точке 3 при шахматном расположении горелок

Рисунок 9– Поверхности отклика изменения облученности в характерных точках при использовании инфракрасных излучателей мощностью 2,9кВт.

Поверхность отклика облученности в точке 4 для коридорного расположения (рис. 9б) представляет себя также «возвышающийся гребень», в котором точки экстремума отсутствуют. Как видно из представленного рисунка минимальная облученность получается при максимальной высоте

подвеса и минимальном числе рядов. Ранее уже было отмечено, что при таком соотношении факторов облученность в точке 2 не превышает допустимого значения. Варианты с максимальным количеством рядов и максимальной высотой подвеса рассматриваться не могут, так как при данном сочетании параметров облученность значительно превышает допустимые значения. Таким образом, при коридорном расположении самым рациональным вариантом будет установка излучателей на максимальной высоте при наименьшем числе рядов.

На рис. 9в представлена поверхность отклика типа «минимакс», характеризующая изменение облученности в точке 2 для шахматного расположения горелок инфракрасного излучения. Минимальная облученность получается при максимальной высоте подвеса и среднем количестве рядов. При этом следует заметить, что даже самая минимальная облученность превышает нормированное значение. Поверхность «минимакс» характеризуется тем, что экстремум находится вблизи центра эксперимента и при увеличении высоты подвеса, мы можем получить минимальную точку, соответствующую нормативным требованиям. Однако в данном случае увеличение высоты подвеса ограничено размерами здания.

Поверхность отклика облученности в точке 3 (рис.9г) представляет собой типичный «возвышающийся гребень». Допустимые значения облученности получаются при минимальном числе рядов и максимальной высоте подвеса. С учетом того, что облученность в точке 2 на всех уровнях варьирования факторов превышает допустимые значения, то говорить о возможно использования схемы с шахматной расстановкой не имеет смысла. Таким образом, при использовании горелок мощностью 2,9 кВт схема рационального размещения отопительных приборов может быть представлена только одним вариантом.

Характеристика рациональных вариантов расположения излучателей представлена в таблице 8.

Таблица 8. Характеристика выбранных схем расположения инфракрасных излучателей

Количество горелок	40	67
Мощность горелки. кВт	2,9	5
Число рядов	3	3
Высота подвеса	7	7
Расстояние между рядами (В), м	3,85	3,85
Расстояние между горелками (А), м	3,64	2,17

Список рекомендуемой литературы

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов – М.: Книга по Требованию, 2012. – 352 с. – Режим доступа: URL: <http://static.my-shop.ru/product/pdf/119/1184632.pdf>
2. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Колос : Ленингр. отд-ние, 1980. - 168 с.
3. Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа/Ю.А. евдокимов, В. И. Колесников, А. И.Тетерин. – Москва : Наука, 1980. 228 с.
4. Мухачёв В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента: Учебное пособие. /В.А. Мухачев -Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. — 118 с.

Токарева Анна Николаевна
кандидат технических наук, доцент

Грачева Наталья Николаевна
кандидат технических наук, доцент

Панченко Сергей Викторович
кандидат технических наук, доцент

Демченко Мария Станиславовна
кандидат технических наук, доцент

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОФАКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Методические указания

Издается в авторской редакции

Объем ЭИ: 1,86 Мб

Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF)

[На титульную страницу](#)