

**ВЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
инженерный факультет  
кафедра технологического и  
энергетического оборудования**

Отчет о лабораторной работе  
№2

**«Оптимизация рабочего  
процесса молочного  
охладителя ОМ-1»**

- **Цель работы:** Определить область оптимальных технологических режимов молочного охладителя.

- 

- **НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ:**

- Охладитель молока ОМ-1.
- Термометры (от 0° ... 100°С).
  - Мерные сосуды.
  - Секундомер.

# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- На эффективность работы молочных охладителей влияние оказывают ряд технологических факторов: начальные температуры молока и охлаждающей жидкости, стоимость охлаждающей жидкости, материал стенок охладителя, соотношение между подачей охлаждающей жидкости и подачей молока и др.
- В экспериментах лабораторной работы приняты два основных технологических фактора - подача охлаждающей воды **В** и подача молока **М**, соотношение которых характеризуется коэффициентом  $n = \frac{B}{M}$  ти подачи воды:
  -
- где **В** - подача охлаждающей воды, кг/с;
- **М** - подача молока, кг/с.

- В качестве критерия оптимизации при оценке эффективности молочного охладителя удобно принять средний коэффициент теплопередачи:

$$K, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2, \text{С}^0}$$

- Чем больше численное значение **K**, тем больше объем тепла с единицы поверхности охладителя будет снято и тем меньших габаритов будет охладитель при одинаковом объеме температуры.

- Оптимальное сочетание факторов **В** и **М** необходимо определить с помощью теории планирования эксперимента методом крутого восхождения по поверхности откликов (метод Бокса-Уилсона), который предусматривает варьирование факторов на двух уровнях (верхнем +1 и нижнем -1).
- Процедура крутого восхождения предусматривает назначение уровней варьирования факторов, составление плана эксперимента, реализацию плана, расчета коэффициентов регрессии, статистическую оценку результатов опытов и анализ математической модели.
- Поскольку в нашем случае выбрано два фактора, то целесообразно реализовать полный факторный эксперимент типа  $2^2=4$ .

Обозначения	Факторы		Экспериментальная оценка критерия оптимизации	
	Подача воды В, кг/с	Подача молока М, кг/с	$\bar{y}(y) \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	$\bar{y}(k) \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$
	$X_1$	$X_2$		
Верхний уровень +1	0,53	0,2		
Нижний уровень -1	0,22	0,09		
План опытов: 1	+	+		
2	-	-		
3	+	-		
4	-	+		
Оценки коэффициентов регрессии	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_{12}$
Критерий Фишера F	$f_1$			
	$f_2$			

**Таблица 1 - Матрица планирования и результаты расчетов**

# ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- Для реализации плана эксперимента (таблица 1) необходимо установить с помощью регулирующих вентилей установки необходимые уровни факторов.
- Перед началом опытов:
  1. Снять размеры элементов секции охладителя и определить площадь поверхности охлаждения  $F$ ,  $\text{м}^2$  по формуле:
    - $F = 1,2 L \cdot H \cdot Z$ ;
  - где  $L$  - длина пластины охладителя,  $L = 0,6$  м;
  - $H$  - ширина пластины охладителя,  $H = 0,07$  м;
  - $Z$  - число пластин в охладителе,  $Z = 41$ .
    - $F = 1,2 \cdot 0,6 \cdot 0,07 \cdot 41 = 2,07 \text{ м}^2$

- 2. Экспериментально-теоретическое определение среднего коэффициента теплопередачи на каждом режиме производится в таком порядке.
- Производят пуск установки в работу до установившегося режима. Время начала и окончания работы фиксируется секундомером.
- В период охлаждения фиксируются показания термометров, установленных на прямом и обратном водопроводах секции в молокоприемнике и молокосорборнике, а также в начале и конце линии охлаждающей воды.
- Секундомер останавливают в тот момент, когда пропущено заданное количество молока.
- Результаты опыта записать в таблица 2.

№№ строки плана	Время опыта, с		M <sub>1</sub> кг	B <sub>1</sub> кг	t <sup>нач</sup> <sub>м'</sub> °C	t <sup>кон</sup> <sub>м'</sub> °C	t <sup>нач</sup> <sub>в'</sub> °C	t <sup>кон</sup> <sub>в'</sub> °C
	В	М						
1	16	21	5	10		29		28
2	19	25	5	10		29		28
3	15	22	5	10	45	30	27	29
4	17	20	5	10		30		29
5	17	19	5	10		31		30
6	18	20	5	10		31		30

- 2.1. Подача установки, кг/ч:

$$M = \frac{3600M_i}{t}$$

- где  $M_i$  - количество охлажденного молока за время опыта;
- $t$  - продолжительность опыта, с.
- Подача молока кг/ч

$$M_1 = \frac{3600 \cdot 5}{21} = 875 \text{ кг/ч}; \quad M_2 = \frac{3600 \cdot 5}{25} = 720 \text{ кг/ч};$$

$$M_3 = \frac{3600 \cdot 5}{22} = 818 \text{ кг/ч}; \quad M_4 = \frac{3600 \cdot 5}{20} = 900 \text{ кг/ч};$$

$$M_5 = \frac{3600 \cdot 5}{19} = 947 \text{ кг/ч}; \quad M_6 = \frac{3600 \cdot 5}{20} = 900 \text{ кг/ч}$$

- Расход воды водяной секцией, кг/ч

$$B = \frac{3600B_i}{t}$$

- $B_i$  – количество воды за время  $t$  опыта, кг

$$B_1 = \frac{3600 \cdot 10}{16} = 2250 \text{ кг/ч}; \quad B_2 = \frac{3600 \cdot 10}{19} = 1895 \text{ кг/ч};$$

$$B_3 = \frac{3600 \cdot 10}{15} = 2400 \text{ кг/ч}; \quad B_4 = \frac{3600 \cdot 10}{17} = 2117 \text{ кг/ч};$$

$$M_5 = \frac{3600 \cdot 10}{17} = 2117 \text{ кг/ч}; \quad M_6 = \frac{3600 \cdot 10}{18} = 2000 \text{ кг/ч};$$

- 2.3. Логарифмическая разность

температур

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{2,31 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} = \frac{(t_M^{наг} - t_B^{кон}) - (t_M^{кон} - t_B^{наг})}{2,31 \lg \frac{t_M^{наг} - t_B^{кон}}{t_M^{кон} - t_B^{наг}}}$$

- где  $\Delta t_H$  - разность температуры между начальной температурой молока и конечной температурой воды;
- $\Delta t_K$  - разность температур между конечной температурой молока и начальной температурой воды.

- $$\Delta t_{cp1} = \frac{(45 - 28) - (29 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 28}{29 - 27}} = 7,02^{\circ}\text{C}$$

- $$\Delta t_{cp2} = \frac{(45 - 28) - (29 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 28}{29 - 27}} = 7,02^{\circ}\text{C};$$

- $$\Delta t_{cp3} = \frac{(45 - 29) - (30 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 29}{30 - 27}} = 7,77^{\circ}\text{C};$$

- $$\Delta t_{cp4} = \frac{(45 - 29) - (30 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 29}{30 - 27}} = 7,77^{\circ}\text{C};$$

- $$\Delta t_{cp5} = \frac{(45 - 30) - (31 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 30}{31 - 27}} = 8,33^{\circ}\text{C}$$

- $$\Delta t_{cp6} = \frac{(45 - 30) - (31 - 27)}{2,31 \lg \frac{45 - 30}{31 - 27}} = 8,33^{\circ}\text{C}$$

- Средний коэффициент теплопередачи, кВт/(м<sup>2</sup> с):

$$K = \frac{M \cdot C (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})}{\Delta t_{\text{ср}} \cdot F}$$

- где **M** - массовый расход молока, кг/с;
- **C** - теплоемкость молока, C= 3,9356 кДж/(кг· с).
- Поскольку в опытах вместо молока используется вода, то принято
- C= 4,19 кДж (кг· с)

$$K_1 = \frac{0,238 \cdot 4,19 \cdot (45 - 28)}{7,02 \cdot 2,07} = 1,166 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$K_2 = \frac{0,2 \cdot 4,19 \cdot (45 - 28)}{7,02 \cdot 2,07} = 0,979 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$K_3 = \frac{0,23 \cdot 4,19 \cdot (45 - 29)}{7,77 \cdot 2,07} = 0,947 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$K_4 = \frac{0,25 \cdot 4,19 \cdot (45 - 29)}{7,77 \cdot 2,07} = 1,043 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$K_5 = \frac{0,263 \cdot 4,19 \cdot (45 - 30)}{8,33 \cdot 2,07} = 0,958 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$K_6 = \frac{0,25 \cdot 4,19 \cdot (45 - 30)}{8,33 \cdot 2,07} = 0,911 \text{ kBm}/(\text{M}^2 \cdot \text{c})$$

$$\begin{aligned} K_{\text{cp}} &= \frac{K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - K_5 - K_6}{6} = \\ &= \frac{1,166 + 0,979 + 0,947 + 1,043 + 0,958 + 0,911}{6} \\ &= 1,0007. \end{aligned}$$

Данные расчетов сводим в таблицу  
Таблица 3 – Расчетные данные

№	М	t	К	В
1	875	7,02	1,166	2250
2	720	7,02	0,979	1895
3	818	7,77	0,947	2400
4	900	7,77	1,043	2117
5	947	8,33	0,958	2117
6	900	8.33	0,911	2000

Обозначения	Факторы		Экспериментальная оценка критерия оптимизации	
	Пода-ча воды В, кг/с	Подача молока М, кг/с	$\bar{y}(y) \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	$\bar{y}(k) \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$
	$X_1$	$X_2$		
Верхний уровень +1	0,53	0,2		
Нижний уровень -1	0,22	0,09		
План опытов: 1	+	+	0,871	0,8725
2	-	-	1,332	1,3335
3	+	-	0,9731	0,9717
4	-	+	1,2357	1,2343
Оценки коэффициентов регрессии	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$
	1,103	-0,1809	-0,0496	-0,0015
Критерий Фишера F	$f_1$			

**Матрица планирования и результаты расчетов**

# Коэффициенты регрессии рассчитываются по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{N} \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{Y}_u}{N}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{Y}_u}{N}$$

- где  $N$  – число строк матрицы плана,  $N=4$ ;
- $\bar{Y}_u$  - значение критерия оптимизации в  $u$ - ой строке;
- $x_{iu}$  - значение  $i$ -го фактора в  $u$  – ой строке матрицы плана;

$$b_0 = \frac{0,871 + 1,332 + 0,9731 + 1,2357}{4} = 1,103$$

$$b_1 = \frac{0,871 - 1,332 + 0,9731 - 1,2357}{4} = -0,1809$$

$$b_2 = \frac{0,871 - 1,332 - 0,9731 + 1,2357}{4} = -0,0496$$

$$b_{12} = \frac{0,871 + 1,332 - 0,9731 - 1,2357}{4} = -0,0015$$

$$\hat{y} = 1.103 - 0.1809x_1 - 0.0496x_2 - 0.0015x_1x_2$$

- После расчета коэффициентов регрессии по формулам (2) проверяется адекватность модели (1) результатам опыта по критерию Фишера (F - критерий): 
$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}$$

- где  $S_{LF}^2$  - 
$$S_{LF}^2 = \frac{\sum_1^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2}{N - k - 1}$$
 - мера неадекватности.

- где  $\hat{y}_u$  - расчетное значение критерия оптимизации по формуле (1) в  $u$ -ой строке плана;

- $k$  - число факторов,  $k = 2$ ;

- $s_y^2$  - дисперсия ошибок опыта

$$s_y^2 = \frac{\sum_1^m (y_i - \bar{y})^2}{m - 1}$$

- $y_i$  - значения критерия оптимизации в  $i$ -ой параллельном опыте;
- $\hat{y}_u$  - среднее значение критерия оптимизации для строки, которая была реализована несколько раз;
- $m$  - число параллельных опытов.

Модель (1) считается адекватной, если расчетное значение F-критерия меньше (F табл.). Табличное значение F табл. Применяется по таблицам математической статистики с числом степеней свободы числителя  $f_1 = N - k - 1$  и знаменателя  $f_2 = m - 1$ , в зависимости от уровня значимости:

$F_{0,05} = 18,51$	при	$f_1 = 1,$	$f_2 = 2$
$F_{0,05} = 200$	при	$f_1 = 2,$	$f_2 = 1$
$F_{0,05} = 98,49$	при	$f_1 = 1,$	$f_2 = 2$
$F_{0,05} = 4999$	при	$f_1 = 2,$	$f_2 = 1$

$$S_{LF}^2 = \frac{(0,8725 - 0,871) + (1,3335 - 1,332) + (0,9717 - 0,9731) + (1,2343 - 1,2357)}{4 - 2 - 1} = 0,0002$$

$$S_y^2 = \frac{(1,0007 - 1,166)^2 + (1,0007 - 0,947)^2 + (1,0007 - 0,958)^2}{3 - 1} = 0,0084$$

$$F = \frac{0,0002}{0,0084} = 0,0238$$

Вывод: Модель адекватна, так как расчетное значение  $F$ -критерия меньше  $F$ -табл.

- 2. Провести анализ полученной модели регрессии (10) графоаналитическим методом. Для чего необходимо построить двумерные сечения в следующей последовательности.
- 2.1. Задаем значения  $\hat{\theta}_1$  (В пределах области экспериментирования) и подставляем в уравнение (10).
- 2.2. Задавая значениями  $x_1$  или  $x_2$  равными -1; -0,5; 0; 0,5; 1, рассчитать по (10) значение  $x_1$  или  $x_2$ .
- В координатах  $x_1, x_2$  по полученным точкам построить линию равного выхода  $\hat{\theta}$ .
- 2.3. Вновь задаем значениями  $x_1$  или  $x_2$ , строим двумерное сечение. Образец двумерного сечения показан на рисунке 4.

	-1	-0,5	0	0,5	1
0,8	10,06	8,05	6,11	4,22	2,39
0,95	6,94	4,98	3,08	1,18	-0,55
1,1	3,82	1,91	0,06	-1,74	-3,48
1,25	0,71	-1,15	-2,96	-4,72	-6,42
1,40	-2,41	-4,22	-5,99	-7,70	-9,35