EDN VZYNWC DOI 10.5281/zenodo.17395053
УДК 66.045.53:519.246.8

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНИ

© 2025 ***Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Панюжев А.А.***

В статье рассматривается вопрос прогнозирования работы малогабаритной пленочной градирни, используемой для охлаждения оборотной воды производственного предприятия. Выполнена оценка значимости влияния метеорологических, технологических и конструктивных параметров на степень охлаждения воды с применением многофакторных регрессионных моделей. Анализ результатов показал, что наиболее значимые факторы, влияющие на степень охлаждения воды в пленочной градирне, это температура воды на входе в градирню, скорость воздуха и объемный коэффициент массоотдачи, который определяется конкретным типом оросителя.

Ключевые слова: оборотная вода, пленочная градирня, насадочный слой, испарительное охлаждение степень охлаждения воды, регрессионный анализ.

Введение. К устройствам, предназначенным для охлаждения технологической оборотной воды на пищевых предприятиях, относятся градирни, чиллеры, испарительные конденсаторы, испарители теплонасосных установок. В указанном водоохлаждающем оборудовании осуществляются такие процессы отвода тепловых потоков как тепломассоперенос (в градирнях) и теплопередача (в чиллерах, испарителях ТНУ) при этом речь идет о естественном (испарительном) и парокомпрессионном охлаждении [1-4].

Принципиально все виды градирен делятся на открытые, закрытые и смешанные. Подробная классификация градирен с учетом направления контакта сред и способа организации тяги приведена в [1, 4]. На степень охлаждения воды в градирне любой конструкции прямое влияние оказывает организация тепломассообменных процессов в рабочей зоне. Зачастую там устанавливается насадочный слой - ороситель, конфигурация которого имеет доминирующее влияние на степень охлаждения оборотной воды.

Известно, что оросители классифицируются по состоянию и назначению на: фиксированные (к ним относятся регулярные) и псевдоожиженные (к ним относятся свободные). Объемный коэффициент массоотдачи оросителя β_{pv} определяется на основании экспериментов для каждой конкретной конструкции оросителя в диапазоне рабочих скоростей воздуха и удельных гидравлических нагрузок.

За последние десятилетия появилось достаточно много работ, в которых предлагаются и экспериментально изучаются конструктивные модификации насадок (оросителей) градирен, принципиально новые формы и даже материалы, а также проводятся исследования по безнасадочным конструкциям [5].

Градирни относятся к вспомогательному оборудованию, поддерживающему целостность и относительную стабильность производственных процессов, при этом нельзя недооценивать тот факт, что от качества работы градирни (обеспечение снижения температуры воды) зависит требуемый расход воды в оборотной системе, напрямую определяющий расход электроэнергии на ее перекачку, а также надежность и технико-экономические показатели работы технологического оборудования.

Работа градирни как контактного смесительного тепломассообменного аппарата определяется множеством факторов: технологическими (расход оборотной воды, $G_ж$, м^3/(м^2·ч), удельный расход воздуха $\lambda = \frac{G_г}{G_ж}$ отношение массового расхода воздуха к массовому расходу воды, количество теплоты, которую необходимо отвести от продуктов, аппаратов или охлаждаемого оборудования – удельная тепловая нагрузка $Q_{уд}$, кДж/(м^2·ч), требования к устойчивости охладительного эффекта), метеорологическими (температура, относительная влажность входящего воздуха, температура по смоченному термометру атмосферного воздуха), экологическими (провоцирование эрозии близлежащей почвы, шумовое загрязнение, сложная утилизация полимерных конструктивных элементов, потребление электроэнергии), химическими (химический состав добавочной и оборотной воды, соответствие санитарно-гигиеническим требованиям), экономическими (текущие и амортизационные затраты).

Авторы [3] отмечают, что наибольшее влияние на процесс охлаждения воды оказывают четыре фактора: перепад температур воды Δt, °C; температура окружающего воздуха $t_г$,°C; относительная влажность воздуха φ, %; подача насоса Q, м^3/ч.

Нормативными параметрами эксплуатации градирен являются: удельная тепловая нагрузка $Q_{уд}$, кДж/(м^2·с); перепад температур воды $\Delta t = t_{ж1} - t_{ж2}$, °C; удельная гидравлическая нагрузка $G_{уд}$, м^3/(м^2·ч); разность температур охлажденной воды и воздуха по смоченному термометру, $\delta = t_{ж2} - t_{см.т}$, °C.

Как отмечается в работе [6] при выполнении теплотехнических расчетов определяют температуру охлажденной в градирне воды $t_{ж2}$, плотности орошения $q_ж$ и площади орошения градирни F. Значение $t_{ж2}$ оказывает существенное влияние на параметры технологического процесса, в частности, на значение температуры охлаждаемого теплоносителя (усл. Продукта) $t_{пр}$, размеры градирен, диаметры труб, подачу насосов, потребление электроэнергии. Значительное повышение $t_{пр}$ в результате увеличения разности $t_{пр} - t_{ж2}$ или увеличения $t_{ж2}$ может повлечь за собой снижение качества продукции и уменьшение производительности технологических установок. Целесообразно определять $t_{пр}$ и $t_{ж2}$, исходя из требований технологического процесса и экономических соображений путем расчетов совместной работы ТОА, градирни и циркуляционной насосной станции.

Для оценки эффективности работы градирни в водооборотном цикле используются следующие коэффициенты [1, 4]:

– термический коэффициент полезного действия градирни, %:

$$E_ж = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{t_{ж1} - t_{см.т.}}.$$

где $t_{ж1}$ – температура воды на входе в градирню, °C; $t_{ж2}$ – температура воды на выходе и градирни, °C; $t_{см.т}$ – температура атмосферного воздуха по смоченному термометру, °C (теоретический предел охлаждения воды в градирне);

– степень использования воздуха $E_г$, %:

$$E_г = \frac{h_{г2} - h_{г1}}{h^*_{г2} - h_{г1}}, \quad (1)$$

где $h^*_{г2}$ – удельная энтальпия насыщенного воздуха, кДж/кг;

– коэффициент эффективности градирни, %:

$$\eta_{эф} = \frac{t^{н}_{ж2} - t_{см.т}}{t^{ф}_{ж2} - t_{см.т.}}, \quad (2)$$

где $t^{н}_{ж2},\ t^{ф}_{ж2}$ – нормативное и фактически значения температуры охлажденной воды, °С;

– критерий эффективности работы градирен:

$$K_{ЭРГ} = \Delta t / t_{ж2}. \quad (3)$$

В формулы (1)-(3) входит разность значений температуры воды. В отличие от E и $\eta_{эф}$, коэффициент Кэрг является интегральным показателем эффективности работы градирен, учитывающим все условия эксплуатации градирен. Значение Кэрг всегда меньше единицы.

Для повышения качества проектного расчета степени охлаждения воды Δt, авторы поставили себе цель получить новые, более точные, статистические формулы для определения Δt и на основании ряда экспериментальных работ и определить степень влияния метеорологических, технологических и конструктивных параметров (факторов) на ее величину.

В такой ситуации целесообразно воспользоваться методами регрессионного анализа, на основе которых в ряде случаев можно получить вероятностно-статистические модели, реализующие зависимость $\Delta t = f(t_{ж1}, t_{г}, v_{г}, \varphi, \beta_{pv})$.

Объектом наших исследований является малогабаритные противоточные градирни с насадочным слоем пленочного типа в рабочей зоне.

Цель работы: прогнозирование параметров работы малогабаритной пленочной градирни на основе корреляционно-регрессионного анализа.

Основной материал исследования. Для достижения поставленной цели авторы собрали статистику – результаты тепломассообменных испытаний для насадок регулярной структуры, имеющих высокоразвитую структурированную поверхность из полимерных материалов (полиэтилена низкого давления, полипропиленовых листов) представленную в открытом доступе (таблица 1) при плотности орошения $q_{ж}$ = 8,8…9,0 м^3/(м^{2}час).

Таблица 1. Типы насадок, используемых в малогабаритных противоточных аппаратах для исследования процессов тепломассообмена

Тип насадки	Особенности профиля насадки и укладки в рабочей зоне градирни	Материал	Источник
Короткослоевая насадка КСН-1	Ярусы одинаковой высоты, расположенные с поворотом каждого последующего яруса на 90° в горизонтальной плоскости по отношению к предыдущему. Насадка КСН-1 состоит из трех ярусов высотой по h = 0,3 м и двух разрывов по δ = 0,03 м каждый. Общая высота блока H = 0,96 м.	Полимер	[7]
Короткослоевая насадка КСН-2	Насадка КСН-2 состоит из шести ярусов высотой по h = 0,15 м и пяти разрывов высотой по δ = 0,03 м. Общая высота блока H = 1,05 м.	Полимер	[7]

Насадка из гладких труб	Наружный диаметр труб d =50 мм	Полиэтилен	[8]
Насадка из гофрированных труб	Наружный диаметр труб d = 50 мм	Полиэтилен	[8]
комбинированная насадка из гофрированных труб и гофрированных труб 0,2 м в навал	Верхний хаотичный слой (высота h_2 = 0,2 м) из полиэтиленовых колец (50х50мм) (т.е. аналог колец Рашига 50х50мм) Высота регулярной насадки H_1 = 1,0 м; нерегулярной H_2 = 0,2 м. Общая высота комбинированной насадки H = 1,2 м.	Полиэтилен	[8]

С помощью встроенного анализа в табличном процессоре Microsoft Excel построена матрица корреляционной зависимости факторов и целевой функции (таблица 2).

Таблица 2. Статистические данные для построения модели

Номер п/п	Степень охлаждения воды Δt, °C	Температура воды, $t_{ж1}$, °C	Температура воздуха $t_г$, °C	Скорость воздуха, v, м/с	Относи-тельная влажность φ, %	Объемный коэффи-циент массоотдачи, β_{pv}
	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	3,54	35,33	26,4	0,82	37,6	0,658
2	4,75	35,2	25,6	1,2	39	0,93
3	5,53	35,19	25,8	1,54	38,7	1,1184
4	6,37	35,13	27,4	1,94	36,4	1,352
5	6,84	35,07	28,7	2,26	35	1,513
6	7,01	34,9	30	2,5	33,3	1,609
7	4,21	35,15	23,6	0,82	37,1	0,7649
8	4,91	35,02	24,7	1,2	37,1	0,959
9	5,63	35,01	25,6	1,54	36,7	1,139
10	6,46	34,94	26,7	1,94	35,4	1,37
11	6,77	34,56	28,3	2,26	32,9	1,528
12	7,27	34,6	29	2,5	31	1,66
13	4,04	35,43	28,6	0,82	38,6	0,7467
14	5,06	35,37	28,4	1,2	37,8	1,0018
15	6,28	35,31	27,7	1,54	36,5	1,2865
16	6,61	35,23	27,6	1,94	34,3	1,5021
17	7,11	34,94	27,2	2,26	31,7	1,6566
18	7	34,1	27,3	2,5	30	1,7252
19	9,6	40,2	20,8	1	79	2,52
20	12,3	40,3	21	1,5	79	2,83
21	14,3	40,2	21	2	78	3,29
22	9,4	40,1	19,3	1	75	1,73
23	12,2	40,2	19,5	1,5	75	2,14
24	14,3	40,1	19,3	2	74	2,52
Среднее значения	7,395	36,316	25,396	1,658	45,796	1,5646

Применяя регрессионный анализ [9], можно проводить расчеты, позволяющие оценить влияние варьируемых факторов на Δt и выполнить прогнозирование работы малогабаритной пленочной градирни.

Вывод итогов из программы Microsoft Excel приведен на рис. 1.

ВЫВОД ИТОГОВ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,9886
R-квадрат	0,9774
Нормированный R-квадрат	0,9711
Стандартная ошибка	0,5230
Наблюдения	24,0000

Дисперсионный анализ

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Значимость F*
Регрессия	5,0000	212,8256	42,5651	155,6054	3,69689E-14
Остаток	18,0000	4,9238	0,2735		
Итого	23,0000	217,7494			

	Коэффициенты	*Стандартная ошибка*	*t-статистика*	*P-Значение*	*Нижние 95%*	*Верхние 95%*	*Нижние 95,0%*	*Верхние 95,0%*
Y-пересечение	-42,566	18,081	-2,354	0,030	-80,554	-4,579	-80,554	-4,579
Переменная X 1	1,482	0,610	2,432	0,026	0,202	2,763	0,202	2,763
Переменная X 2	-0,193	0,086	-2,234	0,038	-0,374	-0,011	-0,374	-0,011
Переменная X 3	2,086	0,535	3,899	0,001	0,962	3,209	0,962	3,209
Переменная X 4	-0,092	0,092	-1,000	0,330	-0,284	0,101	-0,284	0,101
Переменная X 5	1,124	0,683	1,645	0,117	-0,311	2,559	-0,311	2,559

Рис. 1. Вывод итогов в программе Microsoft Excel

Для предварительно выбранных на предыдущем этапе переменных было найдено уравнение линейной множественной регрессии вида:

$$y = -42.566 + 1.4825x_1 - 0.1926x_2 + 2.0855x_3 - 0.0917x_4 + 1.1236x_5 . \tag{4}$$

Параметры при x называются коэффициентами «чистой» регрессии. Они характеризуют среднее изменение результата с изменением соответствующего фактора на единицу при неизмененном значении других факторов, закрепленных на среднем уровне. В нашем случае видно, что с ростом температуры воды на входе в градирню на 1 °С при неизменных других факторах степень охлаждения увеличится на 1,48 °С, а при повышении температуры наружного воздуха, поступающего на градирню, на 1 °С, степень охлаждения снизится на 0,19 °С; при повышении значения объемного коэффициента массоотдачи на единицу степень охлаждения увеличивается на 1,123 °С; наиболее значимым фактором на этом этапе является скорость воздуха (x_3).

Уравнение множественной регрессии в естественной форме:

$$\hat{t}_y = \sum_i^n \beta_i \cdot t_{xi} \ ,$$

где β_i – стандартизованный коэффициент регрессии.

Стандартизованные коэффициенты регрессии демонстрируют, на сколько единиц в среднем измениться результат при изменении соответствующего фактора x_i на одну единицу, при условии, что средний уровень других факторов не меняется. Поскольку все переменные заданы как центрированные и нормированные, стандартизованные коэффициенты регрессии β_i могут быть сопоставлены между собой [9]. Сравнение этих коэффициентов позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на результат. Это является основным преимуществом стандартизованных коэффициентов регрессии по сравнению с коэффициентами «чистой» регрессии, которые не подлежат сравнению.

Теперь рассмотрим уравнение регрессии в стандартизованном формате. На основе естественных коэффициентов регрессии вычислим стандартизированные коэффициенты, исользуя следующую формулу:

$$\beta_i = b_i \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y},$$

где σ_{xi} – среднее квадратическое отклонение для признака x_i; σ_y – среднее квадратическое отклонение для признака y.

Тогда уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{t}_y = 1.107 t_{x1} - 0.2142 t_{x2} + 0.3839 t_{x3} - 0.5479 t_{x4} + 0.2476 t_{x5}.$$

Можно отметить, что наибольшее влияние на глубину охлаждения оказывают начальная температура воды, скорость воздуха, относительная влажность; наименьшее влияние оказывает температура воздуха на входе.

Средние показатели эластичности по совокупности демонстрируют, на сколько процентов в среднем изменится результат при изменении соответствующего фактора на 1 %. Эти показатели могут быть сопоставлены друг с другом, что позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на результат.

Коэффициент эластичности определяется [9]:

$$\overline{Э_i} = b_i \cdot \frac{\overline{x_i}}{\overline{y_{xi}}},$$

где $\overline{x_i}$ – средние значения x ; $\overline{y_{xi}}$ – средние значения y.

Получены: $\overline{Э_1} = 7.279$, $\overline{Э_2} = -0.661$, $\overline{Э_3} = 0.467$, $\overline{Э_4} = -0.568$, $\overline{Э_5} = 0.238$. Все коэффициенты, кроме первого, меньше 1.

Фактором, оказывающим наибольшее влияние на результативный признак y, является x_1, т.е. увеличение температуры воды (от своего среднего значения) на 1 % увеличивает степень охлаждения в среднем на 7,279 %; увеличение температуры воздуха на 1% уменьшит степень охлаждения на 0,661%; увеличение скорости воздуха на 1% увеличивает степень охлаждения в среднем на 0,467%, увеличение относительной влажности на 1% уменьшит степень охлаждения на 0, 568 % и увеличение коэффициента массоотдачи на 1 % увеличит степень охлаждения на 0, 238 %.

Для оценки качества уравнения регрессии используются парные коэффициенты корреляции:

$$r_{yx_i} = \frac{\mathrm{cov}(y, x_i)}{\sigma_y \cdot \sigma_{x_i}} = \frac{\overline{y \cdot x_i} - \overline{y} \cdot \overline{x_i}}{\sigma_y \cdot \sigma_{xi}},$$

где σ_y – общая дисперсия результативного признака y; σ_{x_i} – общая дисперсия i –го фактора.

Используем инструмент «Корреляция» пакета «Анализ данных», который формирует матрицу парных коэффициентов корреляции (таблица 3).

Таблица 3. Матрица парных коэффициентов корреляции

	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y	1					
x_1	0,853564389	1				
x_2	-0,723534583	-0,904039099	1			
x_3	0,266676666	-0,245193762	0,368907297	1		
x_4	0,839691698	0,996295501	-0,912331562	-0,267819669	1	
x_5	0,947859758	0,776893696	-0,604058083	0,349582199	0,773549004	1

Частные коэффициенты корреляции отражают степень связи между результатом и соответствующим фактором при элиминировании (устранении влияния) других факторов, включенных в регрессионное уравнение.

Рассчитанные по рекуррентной формуле частные коэффициенты корреляции варьируются от –1 до +1. Сравнение этих коэффициентов позволяет ранжировать факторы по степени их связи с результатом. Частные коэффициенты корреляции дают меру тесноты связи каждого фактора с результатом в чистом виде.

Как видно из таблицы 3, большинство коэффициентов (включая и по модулю), больше 0,6, т.е. связь заметная. Она наблюдается между: y-x_1, y-x_2, y-x_4; y-x_5; x_1-x_2, x_1-x_4, x_1-x_5, x_2-x_4; x_2-x_5, x_4-x_5, т.е. данные коэффициенты могут быть коллинеарными.

Коэффициенты частной корреляции более высоких порядков можно определить через коэффициенты частной корреляции более низких порядков по рекуррентной формуле:

$$r_{yx_i/x_j} = \frac{r_{yx_i} - r_{yx_j} \cdot r_{x_i x_j}}{\sqrt{(1-r^2_{yx_j})\cdot(1-r_{x_i x_j})}}. \quad (5)$$

Определяем:

$$r_{yx_1/xy_2} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx2}\cdot r_{x1x2}}{\sqrt{(1-r^2_{yx2})\cdot(1-r^2_{x1x2})}} = \frac{0,8535-(-0,7235)\cdot(-0,9040)}{\sqrt{(1-(-0,7235^2)\cdot(1-(-0,9040^2))}} = \frac{0,1994}{\sqrt{0,476\cdot 0,1827}} = 0,677.$$

$$r_{yx_1/x_3} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx3}\cdot r_{x1x3}}{\sqrt{(1-r^2_{yx3})\cdot(1-r^2_{x1x3})}} = \frac{0,8535-(0,2667)\cdot(-0,245)}{\sqrt{(1-0,2667^2)\cdot(1-(-0,245)^2)}} = \frac{0,9188}{\sqrt{0,93\cdot 0,94}} = 0,987.$$

$$r_{yx_1/x_4} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx4}\cdot r_{x1x4}}{\sqrt{(1-r^2_{yx4})\cdot(1-r^2_{x1x4})}} = \frac{0,8535-0,8397\cdot 0,9929}{\sqrt{(1-0,8397^2)\cdot(1-0,9929^2)}} = \frac{0,0197}{\sqrt{0,294\cdot 0,014}} = 0,363.$$

Аналогично по формуле (5) находим остальные коэффициенты частной корреляции. Полученные данные свидетельствуют, что теснота связи факторов в большинстве случаев варьирует от «заметной связи» до «высокой».

Границы изменения индекса множественной корреляции от 0 до 1. Чем ближе его значение к 1, тем теснее связь результативного признака со всем набором исследуемых факторов. В нашем случае коэффициент множественной корреляции R = 0,98862 (рис. 1), что указывает на достаточно сильную связь.

Нескорректированный коэффициент множественной детерминации R^2 =0,977, что говорит о том, что 97,7 % вариации результата объясняется вариацией представленных в уравнении факторов.

Для предотвращения возможного преувеличения тесноты связи, используется скорректированный индекс (коэффициент) множественной корреляции. Величину скорректированного индекса детерминации можно представить следующей формулой [9]:

$$R^2_{\text{скорр}} = 1-(1-R^2)\cdot\frac{(n-1)}{(n-m-1)},$$

где $m = 5$ – число параметров при переменных x; $n = 24$ – число наблюдений:

$$R^2_{\text{скорр}} = 1-(1-0,977)\cdot\frac{(24-1)}{(24-5-1)} = 0,9706.$$

Значимость уравнения множественной регрессии в целом, так же, как и в парной регрессии, оценивается с помощью F –критерия Фишера:

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1-R^2}\cdot\frac{n-m-1}{m},$$

$$F_{\text{факт}} = \frac{0,977}{1-0,977}\cdot\frac{24-5-1}{5} = 152.92.$$

Близкое значение получено и в поле «F» дисперсионного анализа.

Табличное значение критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $k_1 = m = 5$, $k_2 = n - m - 1 = 24 - 5 - 1 = 18$: $F_{\text{табл}} = F(0,05;5;18) = 2.77$ [9].

Видно, что $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, значит полученное уравнение корреляции является статистически значимым.

Выявив целесообразность включения в уравнение множественной регрессии каждого фактора после остальных факторов. Мерой для оценки включения фактора в модель служит частный F –критерий, т.е. F_{xi}.

Частный F –критерий построен на сравнении прироста факторной дисперсии, обусловленного влиянием дополнительно включенного фактора, с остаточной дисперсией на одну степень свободы по регрессионной модели в целом.

$$F_{xi} = \frac{R^2_{yx_1\ldots x_i\ldots x_m} - R^2_{yx_1\ldots x_{i-1}x_{i+1}\ldots x_m}}{1-R^2_{yx_1\ldots x_i\ldots x_m}}\cdot(n-m-1),$$

где $R^2_{yx_1\ldots x_i\ldots x_m}$ – коэффициент множественной детерминации для модели с полным набором факторов, $R^2_{yx_1\ldots x_{i-1}x_{i+1}\ldots x_m}$ – тот же показатель, но без включения в модель фактора x_i ; n – число наблюдений; m – число параметров в модели (без свободного члена).

Если фактическое значение F_{xi} превышает $F_{\text{табл}} = F(\alpha;k_1;k_2)$, то дополнительное включение фактора x_i в модель статистически оправданно и коэффициент чистой регрессии b_i при факторе x_i статистически значим. Если же фактическое значение F_{xi} меньше табличного, то дополнительное включение в модель фактора x_i не увеличивает существенно долю объясненной вариации признака y, следовательно, нецелесообразно его включение в модель; коэффициент регрессии при данном факторе в этом случае статистически незначим.

Как видим, чтобы воспользоваться данной формулой, необходимы матрица межфакторной корреляции и расчет по ней соответствующих коэффициентов детерминации. Полученные по расчетам данные приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные значения межфакторных коэффициентов детерминации для оценки значимости каждого фактора

Межфакторный коэффициент детерминации, $R^2_{yx_1 \ldots x_{i-1} x_{i+1} \ldots x_m}$	Частный F_{xi} – критерий Фишера	Критерий Фишера табличный $F_{\text{табл}}$	Оценка фактора значимый/ незначимый
$R^2(x_2, x_3, x_4, x_5) = 0.0319$	739,62	2,93	фактор x_1 значимый
$R^2(x_1, x_3, x_4, x_5) = 0,822$	121,3	2,93	фактор x_2 значимый
$R^2(x_{1,} x_2, x_4, x_5) = 0,875$	79,83	2,93	фактор x_3 значимый
$R^2(x_1, x_2, x_3, x_5) = 0,9437$	26,6	2,93	фактор x_4 значимый
$R^2(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,7426$	183,4	2,93	фактор x_5 значимый

Как видно из таблицы 4, все факторы значимы, значит уравнение множественной линейной регрессии сохраняет вид, представленный формулой (4).

Вывод. В работе получена и обоснована линейная модель множественной регрессии, из которой следует, наиболее значимые факторы, влияющие на степень охлаждения воды в пленочной градирне, это температура воды на входе в градирню, скорость воздуха и объемный коэффициент массоотдачи, который определяется конкретным типом оросителя. Полученные на основании экспериментальных данных регрессионные уравнения обладают высокой точностью. Они позволят при первоначальном подборе или модернизации вентиляторной пленочной градирни прогнозировать параметры ее работы в конкретных условиях с определенным оросителем, что в итоге будет способствовать сохранению качества продукции и/или стабильной работе технологических установок, использующих оборотную воду.

В дальнейшем планируется рассмотреть возможность оптимизации процесса теплообмена в пленочной малогабаритной градирне эксергетическим пинч-анализом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карнаух, В. В. Совершенствование процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств / В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков. – Вологда, Москва : ООО «Инфра-Инженерия», 2025. – 259 с. – ISBN 978-5-9729-2148-5.
2. Карнаух, В. В. Особенности гидродинамики в теплообменных аппаратах с насадочным слоем для охлаждения воды / В. В. Карнаух, М. А. Пундик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 57-65. EDN YAABNA.
3. Крюков, О. В. Повышение энергоэффективности водооборотных систем предприятий при оптимизации управления градирнями / О. В. Крюков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2016. – № 19. – С. 5-27. – EDN WMQNWT.
4. Карнаух, В. В. Технологии оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств: анализ состояния и пути совершенствования / В. В. Карнаух // Вестник Московского энергетического института. – 2025. – № 1. – С. 54-66. – DOI 10.24160/1993-6982-2025-1-54-66. – EDN LKBZUP.
5. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
6. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат: 1998. – 376 с.

7. Беренгартен, М. Г. Контактные устройства для градирен : Учебное пособие / М. Г. Беренгартен, М. Г. Лагуткин. – Москва : федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2023. – 132 с. – ISBN 978-5-276-02790-6. – EDN VFVCOT.
8. Столярова, Е. Ю. Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей: дис. … канд. техн. наук: 2.4.6 / Столярова Екатерина Юрьевна ; Казан. гос. энерг. университет. – Казань, 2024. – 194 с.
9. Чалганова, А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel: учебное пособие по дисциплине «Эконометрика» / А. А. Чалганова ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2022. – 90 с. – EDN BVEKEO.

Поступила в редакцию 23.05.2025 г., рекомендована к печати 10.06.2025 г.

AN APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS TO PREDICT THE PERFORMANCE OF A SMALL-SIZE FILM COOLING TOWER

Karnaukh V.V., Biriukov A.B., Paniuzhev A.A.

The article discusses the issue of predicting the operation of a small-size film cooling tower used for cooling the recycled water of an industrial enterprise. An assessment of the significance of the influence of meteorological, technological, and structural parameters on the water cooling degree was carried out using multifactorial regression models. The analysis of the results showed that the most significant factors affecting on the water cooling degree in the small-size film cooling tower are the inlet water temperature, air velocity, and volumetric mass transfer coefficient, which is determined by the specific type of nozzle.

Keywords: recycled water water, film cooling tower, nozzle, evaporative cooling, water cooling degree, regression analysis.

Карнаух Виктория Викторовна
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В. ФГБОУ ВО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк;
профессор кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com

Karnaukh Viktoriia Viktorovna
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Refrigerating and Trade Equipment Department of Tugan-Baranovskogo Donetsk National University of Economics and Trade,
Russian Federation, DPR, Donetsk;
Professor at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.

Бирюков Алексей Борисович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail*:* birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Панюжев Андрей Алексеевич
аспирант ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: cbhbec.cbh@gmail.com

Paniuzhev Andrei Alekseevich
Postgraduate Student of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.