

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 637.133.3

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-235-5-70-78

А.А. Багаев, Е.Б. Семенов

A.A. Bagaev, E.B. Semenov

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВОЙ ТЕОРЕМЫ ПОДОБИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

RESULTS OF APPLICATION OF THE FIRST SIMILARITY THEOREM TO MODELING OF PROCESSES OF ELECTRO-CONTACT HEATING OF LIQUIDS ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

Ключевые слова: *электротермия, жидкости сельскохозяйственные, пастеризация, теория подобия, электроконтактный нагрев, моделирование.*

В сельскохозяйственном производстве термическая обработка жидкостей распространена широко: нагрев воды для поения животных, приготовления кормов, санитарно-гигиенических нужд, пастеризация жидких сред, включая молоко. Наиболее простым в плане технической реализации и энергоэффективным является электроконтактный нагрев, во время которого нагрев жидкости осуществляется путем передачи ей тепловой энергии от теплообменной поверхности, через которую протекает электрический ток. Электроконтактный нагрев позволяет относительно просто контролировать параметры термического процесса и выявлять рациональные режимы, что представляет особый интерес при исследовании быстротекущих и непростых для регистрации режимов в индукционных пастеризаторах молока высокой частоты. Целью является оценка возможности использования первой теоремы подобия для распространения результатов экспериментальных исследований на моделирование устройств и процессов электроконтактного нагрева иной производительности по нагреваемой жидкости. Использованы методы обработки экспериментальных данных, теория подобия. Применение первой теоремы подобия при определении критериев подобия для распространения результатов экспериментальных исследований на иные прогнозируемые показатели технологического процесса и моделирования с использованием уравнений исследуемого процесса вполне возможно. Результатом экспериментальных исследований являются: мощность $P=8000$ Вт, напряжение на выходе трансформатора $U=50$ В, ток через стенку теплообменника $I=160$ А, массовый расход воды $G=500$ кг/ч, температура воды на

выходе $T_{2ж}=31,793^{\circ}\text{C}$. С использованием первой теоремы подобия результаты экспериментальных исследований распространены на массовый расход воды $G=1000$ кг/ч, мощность $P=64960$ Вт, температуру воды на выходе $T_{2ж}=78,98^{\circ}\text{C}$. Первая теорема подобия не указывает способы установления подобия и способы его реализации при построении моделей. Решение этой задачи остается за разработчиком: возможно менять напряжение, ток, площадь теплопередачи, производительность и др.

Keywords: *electrothermy, agricultural liquids, pasteurization, similarity theory, electric contact heating, modeling.*

In agricultural production, thermal treatment of liquids is widespread: heating of water for animal watering, feed preparation, sanitary and hygienic needs, and pasteurization of liquid media including milk. The most simple in terms of technical realization and energy efficient is electro-contact heating when the heating of liquid is carried out by transferring to it the thermal energy from the heat-exchange surface through which the electric current flows. Electro-contact heating allows relatively simple control of thermal process parameters and identification of rational modes which is of particular interest in the study of fast flowing and not easy to register modes in induction milk pasteurizers of high frequency. The research goal is to evaluate the possibility of using the first similarity theorem to extend the results of experimental studies to the modeling of devices and processes of electric contact heating of a different performance on the heated liquid. The methods of experimental data processing and the theory of similarity are used. The application of the first similarity theorem in determining the similarity criteria for spreading the results of experimental studies on other predicted indicators of

technological process and modeling using the equations of the process under study is quite possible. The results of experimental research are as following: power $P = 8000$ W, transformer output voltage $U = 50$ V, current through the heat exchanger wall $I = 160$ A, mass flow rate of water $G = 500$ kg h, and water outlet temperature $T = 31.793^\circ\text{C}$. Using the first similarity theorem, the experimental results

are extended to the mass flow rate of water $G = 1000$ kg h, power $P = 64,960$ W, outlet water temperature $T = 78.98^\circ\text{C}$. The first similarity theorem does not specify the ways of establishing similarity and the ways of its realization when building models. The solution of this problem is left to the developer: it is possible to change voltage, current, heat transfer area, productivity, etc.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Семенов Егор Борисович, магистрант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: egorcho22@mail.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Bagaev710@mail.ru.

Semenov Egor Borisovich, master's degree student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: egorcho22@mail.ru.

Введение

В сельскохозяйственном производстве термическая обработка жидкостей распространена широко: нагрев воды для поения животных, приготовления кормов, санитарно-гигиенических нужд, пастеризация жидких сред, включая молоко. Электротермия как область науки и техники является неотъемлемой частью электротехнологии [1]. В соответствии с известной классификацией способов нагрева [2] для нагрева текущих сред наиболее эффективными будет нагрев сопротивлением, разновидностями которого является электроконтактный (косвенный нагрев) и электродный (прямой нагрев). Наиболее простым в плане технической реализации и энергоэффективным является электроконтактный нагрев, во время которого нагрев жидкости осуществляется путем передачи ей тепловой энергии от теплообменной поверхности, через которую протекает электрический ток [2]. Электроконтактный нагрев позволяет относительно просто

контролировать параметры термического процесса и выявлять рациональные режимы, что представляет особый интерес при исследовании быстропотекающих и непростых для регистрации режимов в индукционных пастеризаторах молока высокой частоты [3-6].

Целью является оценка возможности использования первой теоремы подобия для распространения результатов экспериментальных исследований на моделирование устройств и процессов электроконтактного нагрева иной производительности по нагреваемой жидкости.

Методы и средства

Методы обработки экспериментальных данных, теория подобия.

Экспериментальная часть

Электрическая схема и общий вид экспериментальной установки представлены на рисунке 1.

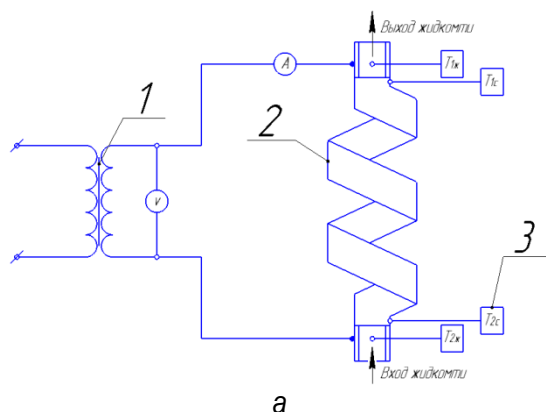


Рис. 1. Экспериментальная установка:

а – электрическая схема, б – общий вид; 1 – сварочный трансформатор ТСШ-160, 2 – теплообменник-змеевик, 3 – измерители температуры, 4 – термопары

В качестве теплообменника использована трубка из нержавеющей стали AISI-316. Теплообменник выполнен в виде змеевика для уменьшения геометрических размеров и увеличения коэффициента теплоотдачи.

В качестве источника напряжения, прикладываемого к теплообменнику-змеевику, и тока использован сварочный трансформатор ТСШ-160. Через теплообменник-змеевик пропусклась вода с начальной средней температурой $T_{1ж} = 18^{\circ}\text{C}$.

Измеряемыми параметрами являлись ток через теплообменник, напряжение, температуры стенки теплообменника на входе $T_{1ст}$ и выходе

$T_{2ст}$, температура воды на входе $T_{1ж}$ и выходе $T_{2ж}$. Температуры измерялись с помощью измерителей-регистраторов ТМ902С К-типе и зондом термодатчика 81532В. Расход жидкости устанавливался датчиком расхода LOUCHEN ZM G1/20, работающим с цифровым расходомером с ЖК-дисплеем и измерителем температуры.

Повторность проведения опытов пятикратная, что обеспечивает достоверную вероятность 0,9 с предельной ошибкой, равной 1 [7, 8].

Технические данные экспериментальной установки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические данные экспериментальной установки

Мощность P , Вт	8000
Напряжение на выходе трансформатора U , В	50
Ток через стенку теплообменника I , А	160
Массовый расход воды G , кг/ч	500 (или 8,4 л/мин.)
Разность температур стенки и воды на выходе ΔT , $^{\circ}\text{C}$	7
Параметры трубки теплообменника	
- масса $M_{ст}$, кг	0,362
- длина l , м	2
- наружный диаметр $d_{нар}$, м	0,015
- внутренний диаметр $d_{вн}$, м	0,014
Плотность нержавеющей стали трубки теплообменника $\rho_{ст}$, кг/м ³	7850
Удельная теплоёмкость воды $c_{ж}$, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$	1,16
Удельная теплоёмкость нержавеющей стали трубки теплообменника $c_{ст}$, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$	0,137

По результатам измерений вычислялась разность температур стенки теплообменника на выходе и входе:

$$T_{2ст} - T_{1ст} = \tau. \quad (1)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Зависимость $\tau=f(t)$ представлена на рисунке 2.

Температура воды на выходе из теплообменника с учетом температуры жидкости на входе $T_{1ж}$ и разности температур стенки и воды на выходе $\Delta T=7^{\circ}\text{C}$:

$$T_{2ж} = \tau + T_{1ж} - \Delta T. \quad (2)$$

В таблице 3 представлены зависимости температуры воды на выходе из теплообменника $T_{2ж}$ от τ .

Таблица 2

Экспериментальные значения разности температур стенки теплообменника на выходе и входе τ от времени t

t , с	0,00001	0,0001	0,00019	0,00028	0,00037	0,00046	0,00055	0,00064
τ , $^{\circ}\text{C}$	1,528	9,534	12,32	13,289	13,627	13,744	13,785	13,8

Продолжение табл. 2

t , с	0,00073	0,00082	0,00091	0,001	0,01	0,1	1	2
τ , $^{\circ}\text{C}$	13,804	13,806	13,807	13,807	13,807	13,807	13,807	13,807

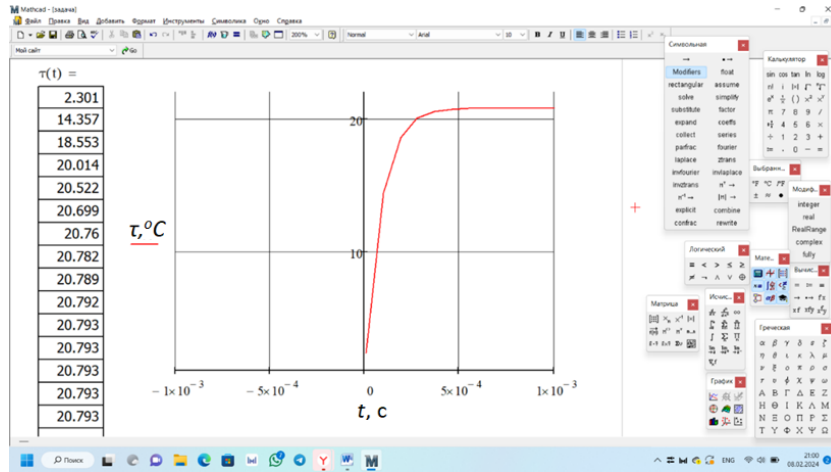


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\tau=f(t)$

Таблица 3

Экспериментальная зависимость температуры воды на выходе из теплообменника $T_{2ж}$ от t

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	2,301	14,357	18,553	20,014	20,522	20,699	20,76	20,782
$T_{2ж}, \text{ }^\circ\text{C}$	13,301	25,357	29,553	31,014	31,522	31,699	31,76	31,782

Продолжение табл. 3

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20,789	20,792	20,793	20,793	20,793
$T_{2ж}, \text{ }^\circ\text{C}$	31,789	31,792	31,793	31,793	31,793

В таблице 4 представлена экспериментальная зависимость температуры жидкости на выходе $T_{2ж}$ от времени t .

На рисунке 3 показана экспериментальная зависимость температуры воды на выходе $T_{2ж}$ от времени t .

Таблица 4

Экспериментальная зависимость температуры жидкости на выходе $T_{2ж}$ от времени t

$T_{2ж}, \text{ }^\circ\text{C}$	13,301	25,357	29,553	31,014	31,522	31,699	31,76	31,782
$t, \text{ c}$	0,00001	0,0001	0,00019	0,00028	0,00037	0,00046	0,00055	0,00064

Продолжение табл. 4

$T_{2ж}, \text{ }^\circ\text{C}$	31,789	31,792	31,793	31,793	31,793
$t, \text{ c}$	0,00073	0,00082	0,00091	0,001	0,01

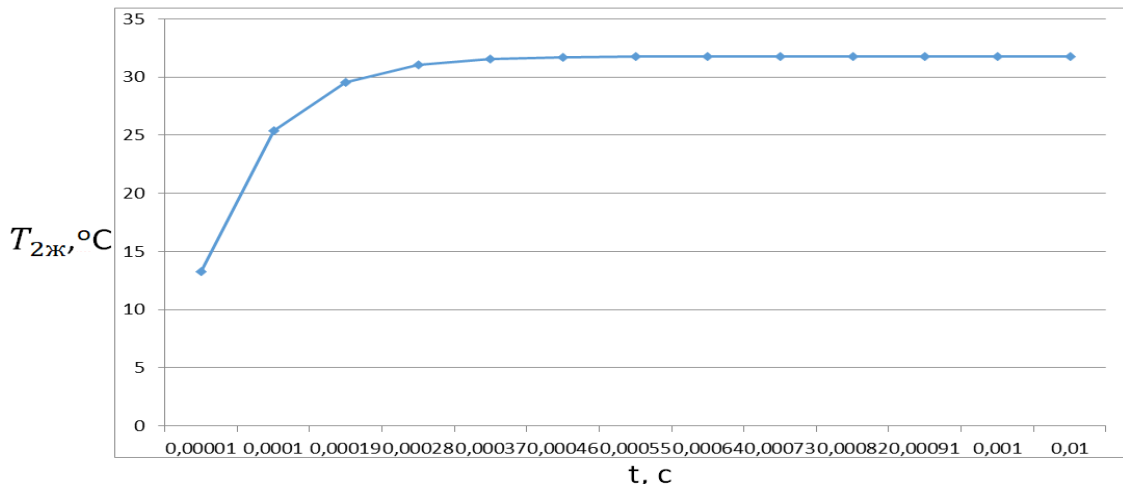


Рис. 3. Экспериментальная зависимость температуры воды на выходе $T_{2ж}$ от времени t

Для моделирования процесса нагрева жидкости в теплообменнике, нагреваемом электроконтактным способом, используем в дальнейшем положения теории подобия.

Результаты и обсуждение

Уравнение теплового баланса за единицу времени dt , ч для рассматриваемой системы имеет вид

$$Pdt = Q_{ст} + Q_{ж} = M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot (T_{2ст} - T_{1ст}) + G \cdot c_{ж} \cdot (T_{2ж} - T_{1ж})dt, \quad (3)$$

где P – мощность, Вт;

$Q_{ст}, Q_{ж}$ – теплота, выделяющаяся в стенке трубки теплообменника и нагреваемой жидкости (вода) соответственно, Вт·ч;

$T_{2ст}, T_{1ст}$ – температура стенки трубки теплообменника в конце и в начале соответственно, °С;

$T_{2ж}, T_{1ж}$ – температура жидкости (воды) в конце и в начале соответственно, °С;

$M_{ст}$ – масса трубки теплообменника, кг;

G – расход жидкости, кг/ч;

$c_{ж}$ – удельная теплоёмкость вод (Вт·ч)/(кг·°С);

$c_{ст}$ – удельная теплоёмкость нержавеющей стали трубки-теплообменника, (Вт·ч)/(кг·°С).

С учетом (1) выражение (3) принимает следующий вид:

$$Pdt = M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot \tau + G \cdot c_{ж} \cdot (\tau - \Delta T) dt, \quad (4)$$

где τ – превышение температуры стенки теплообменника на выходе над температурой на входе (температурой окружающей среды в частном случае);

ΔT – разность температур стенки теплообменника и воды на выходе, °С.

Решение уравнения (4) относительно τ аналогично решению уравнения переходного процесса $i(t)$ в электрической цепи, образованной последовательным включением активного сопротивления R и индуктивности L при включении ее на постоянное напряжение u [9]:

$$\tau = \left(\frac{P + \Delta T \cdot G \cdot c_{ж}}{G \cdot c_{ж}} \right) \cdot \left(1 - e^{-t \frac{G \cdot c_{ж}}{M_{ст} \cdot c_{ст}}} \right). \quad (5)$$

Члены дифференциального уравнения (4) являются однородными функциями параметров,

определяющих протекание рассматриваемого процесса, и их производных.

В таблице 2 и на рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости разности температур стенки теплообменника на выходе и входе τ от времени t : $\tau=f(t)$.

Задача заключается в определении критериев подобия, позволяющих распространить результаты экспериментальных исследований $\tau=f(t)$ на аналогичные процессы с иной производительностью, расходом и температурными режимами $\tau_0=f(t_0)$.

При определении критериев подобия двух подобных процессов $\tau=f(t)$ и $\tau_0=f(t_0)$ по известным уравнениям исследуемого процесса выполняется ряд преобразований исходных уравнений с использованием правила Фурье, в соответствии с которым все члены уравнения, описывающего физический процесс, должны иметь одинаковую размерность [10], что будет показано ниже при рассмотрении размерности критериев подобия $\pi_1, \pi_2 \dots \pi_n$.

Поскольку уравнение исследуемого процесса известно, то для определения критериев подобия вполне возможно применить первую теорему подобия, одна из формулировок которой гласит: «у подобных явлений индикаторы подобия (или комплексы масштабных коэффициентов m_i) I_{π_i} равны единице или критерии подобия π_i численно одинаковы» [10].

В таблице 5 представлены исходные данные для расчета масштабных коэффициентов переменных процесса нагрева жидкости.

С использованием выражений (4) и (5) в таблице 6 приведены результаты расчета зависимости $\tau_0=f(t_0)$, соответствующие массовому расходу воды $G=1000$ кг/ч, мощности $P=64\ 960$ Вт и $\Delta T=24^\circ\text{C}$.

На рисунке 4 представлена зависимость $\tau_0=f(t_0)$, построенная с использованием данных таблицы 6.

В таблице 7 представлены результаты расчета зависимости $\tau_0=f(t_0)$, где $T_{2ж} = \tau_0 + T_{1ж} - \Delta T$.

В таблице 8 представлены результаты расчета $T_{2ж}=f(t)$.

Таблица 5

Исходные данные для расчета масштабных коэффициентов переменных процесса нагрева жидкости

	Масса трубки теплообменника из стали AISI 316 $M_{ст}$, кг	Массовый расход воды G , кг/ч	Мощность P , Вт	Разность температур стенки теплообменника и воды на выходе ΔT , °C
Экспериментальные параметры нагрева	0,362	500	8000	7
Прогнозируемые параметры нагрева	1,02	1000	64 960	24

Масса трубки теплообменника из нержавеющей стали AISI 316 $M_{ст} = V_{ст} \cdot \rho_{ст}$; объем трубки теплообменника $V_{ст} = \frac{\pi \cdot l}{4} \cdot (d_{нар}^2 - d_{вн}^2)$; длина трубки l ; наружный диаметр трубки $d_{нар}$; внутренний диаметр трубки $d_{вн}$ (исходные данные для расчета приведены в таблице 1)

Таблица 6

Зависимость $\tau_o = f(t_o)$

t, c	0,00001	0,0001	0,00019	0,00028	0,00037	0,00046	0,00055	0,00064
$\tau_o, ^\circ C$	6,901	48,55	67,988	77,061	81,295	83,271	84,193	84,623

Продолжение табл. 6

t, c	0,00073	0,00082	0,00091	0,001	0,01	0,1	1	2
$\tau_o, ^\circ C$	84,824	84,918	84,962	84,982	84,992	84,999	85	85

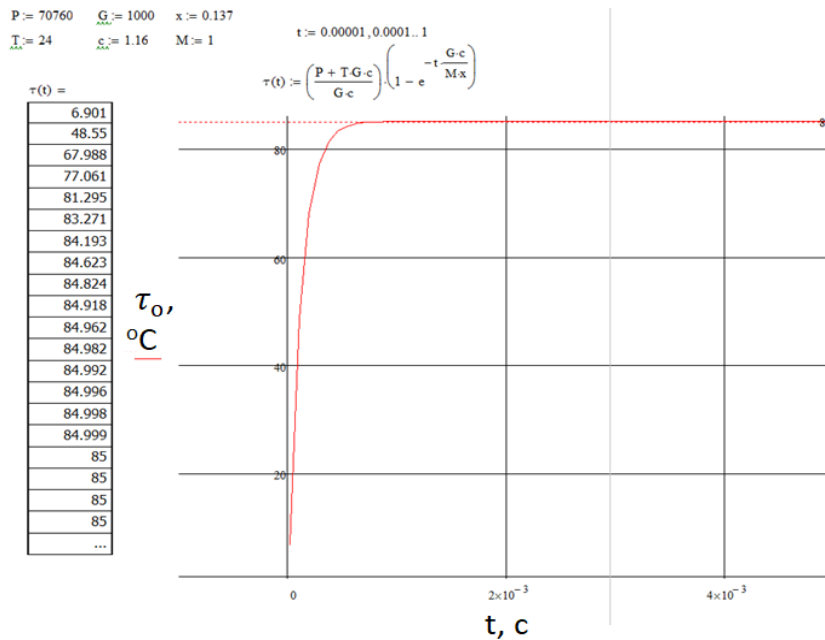


Рис. 4. Зависимость $\tau_o = f(t_o)$

Таблица 7

Результаты расчета зависимости $\tau_o = f(t)$

$\tau_o, ^\circ C$	6,901	48,55	67,988	77,061	81,295	83,271	84,193	84,623
$T_{2ж}, ^\circ C$	0,901	42,55	61,476	71,172	75,292	77,243	78,168	78,606

Продолжение табл. 7

$\tau_o, ^\circ C$	84,824	84,918	84,962	84,982	84,992	84,999	85	85
$T_{2ж}, ^\circ C$	78,824	78,918	78,962	78,982	78,992	78,999	79	79

Результаты расчета зависимости $T_{2ж}=f(t)$

$T_{2ж}, °C$	0,901	42,55	61,476	71,172	75,292	77,243	78,168	78,606
$t_0, с$	0,00001	0,0001	0,00019	0,00028	0,00037	0,00046	0,00055	0,00064

Продолжение табл. 8

$T_{2ж}, °C$	78,824	78,918	78,962	78,982	78,992	78,999	79	79
$t_0, с$	0,00073	0,00082	0,00091	0,001	0,01	0,1	1	2

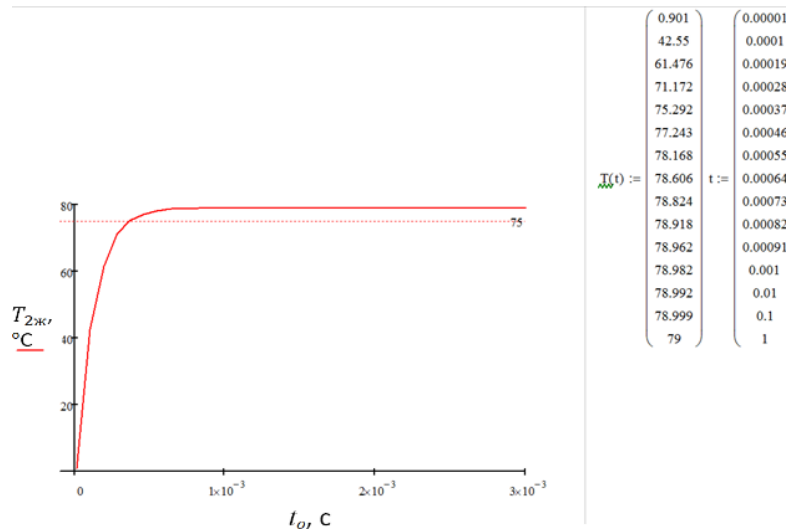


Рис. 5. Зависимость $T_{2ж}=f(t)$

Графическая интерпретация данных таблицы 8 показана на рисунке 5.

На рисунках 3 и 5 особое внимание следует уделить установившимся режимам нагрева после окончания переходного процесса.

С использованием методологии, изложенной в [10], и данных таблицы 5 получены:

критерии подобия

$$\pi_1 = \frac{M_{ст} c_{ст}}{t G c_{ж}} = idem; \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{P}{\tau G c_{ж}} = idem, \quad (7)$$

где 1 и 2 – индексы сопоставляемых процессов; idem означает «соответственно одинакового для всех рассматриваемых процессов»;

масштабные коэффициенты переменных процесса нагрева жидкости:

- для массы нержавеющей стали теплообменника $m_{M_{ст}} = \frac{M_{ст1}}{M_{ст2}} = 0,354$;

- для расхода жидкости $m_G = \frac{G_1}{G_2} = 0,5$;

- для мощности $m_P = \frac{P_1}{P_2} = 0,123$;

- для разности температур стенки теплообменника и воды на выходе ΔT

$$m_{\Delta T} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = 0,29.$$

Индикаторы подобия или степенные комплексы масштабных коэффициентов в соответствии с определением первой теоремы подобия:

$$I_{\pi_1} = \frac{m_{M_{ст}}}{m_G m_t} = 1; \quad (8)$$

$$I_{\pi_2} = \frac{m_P}{m_G m_{\tau}} = 1. \quad (9)$$

При произвольном выборе $m_{M_{ст}}$, m_P и m_G значения τ и t_0 , t и t_0 , определяющие координаты сходственных точек, не могут выбираться произвольно. Необходимо, чтобы

$$m_t = \frac{m_{M_{ст}}}{m_G} = \frac{0,354}{0,5} = 0,708, \quad (10)$$

поскольку $I_{\pi_1} = \frac{m_{M_{ст}}}{m_G m_t} = 1$;

$$m_{\tau} = \frac{m_P}{m_G} = \frac{0,123}{0,5} = 0,245, \quad (11)$$

поскольку $I_{\pi_2} = \frac{m_P}{m_G m_{\tau}} = 1$.

Следовательно, для $t=0,001$ и $\tau=20,79$ сходственными точками будут

$$t_o = \frac{t}{m_t} = \frac{0,001}{0,708} = 0,0014$$

$$\text{и } \tau_o = \frac{\tau}{m_\tau} = \frac{20,79}{0,245} = 84,89, \quad (12)$$

что соответствует температуре жидкости на выходе $T_{2ж}=78,98^\circ\text{C}$.

Заключение

Применение первой теоремы подобия при определении критериев подобия для распространения результатов экспериментальных исследований на иные прогнозируемые показатели технологического процесса и моделирования с использованием уравнений исследуемого процесса вполне возможно. Результатом экспериментальных исследований является: мощность $P=8000$ Вт, напряжение на выходе трансформатора $U=50$ В, ток через стенку теплообменника $I=160$ А, массовый расход воды $G=500$ кг/ч, температура воды на выходе $T_{2ж}=31,793^\circ\text{C}$. С использованием первой теоремы подобия результаты экспериментальных исследований распространены на массовый расход воды $G=1000$ кг/ч, мощность $P=64960$ Вт, температуру воды на выходе $T_{2ж}=78,98^\circ\text{C}$.

Первая теорема подобия не указывает способы установления подобия и способы его реализации при построении моделей. Решение этой задачи остается за разработчиком: возможно менять напряжение, ток, площадь теплопередачи, производительность и др.

Библиографический список

- Куликова, Л. В. Электротехнология: учебное пособие / Л. В. Куликова, А. А. Багаев. – Москва; Берлин: ООО "Директмедиа Паблшинг", 2021. – 373 с. – Текст: непосредственный.
- Багаев, А. А. Электротехнология: учебное пособие / А. А. Багаев, А. И. Багаев, Л. В. Куликова. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с. – Текст: непосредственный.
- Патент RU № 2791097 С1 МКИ F22В 1/28, H05В 6/1. Нагреватель жидкости: № 2022116090: заявл. 14.06.2022: опубл. 02.03.2023 / Багаев А. А., Бобровский С. О., Левин А. М.; заявитель, патентообладатель Алтайский гос. аграр. ун-т. – 3 с. – Текст: непосредственный.
- Патент RU 2772376 С1 МКИ H05В 6/10. Проточный индукционный нагреватель жидкости: № 2021111496: заявл. 21.04.2021: опубл. 20.05.2022 / Багаев А. А., Калинин Ц. И., Бобровский С. О.; заявитель, патентообладатель

Алтайский гос. аграр. ун-т. – 3 с. – Текст: непосредственный.

5. Патент RU 2773671 С1 МКИ H05В 6/10. Проточный индукционный нагреватель текучих сред: № 2021113043: заявл. 04.05.2021: опубл. 07.06.2022 / Багаев А. А., Бобровский С. О.; заявитель, патентообладатель Алтайский гос. аграр. ун-т. – 3 с. – Текст: непосредственный.

6. Багаев, А. А. Методика расчета, оценка энергетической эффективности и направления совершенствования низкотемпературных индукционных коаксиальных нагревателей молока промышленной частоты / А. А. Багаев, С. О. Бобровский. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 7 (146). – С. 60-71.

7. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г. В. Веденяпин. – Москва: Колос, 1967. – 158 с. – Текст: непосредственный.

8. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Ленинград: Колос, 1980. – 168 с. – Текст: непосредственный.

9. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / А. А. Багаев, Л. В. Куликова, Э. В. Кузьмин [и др.]. – Барнаул: Изд-во ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», 2000. – 772 с. – Текст: непосредственный.

10. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов / В. А. Веников, Г. В. Веников. – Москва: Высшая школа, 1984. – 439 с. – Текст: непосредственный.

References

- Kulikova L.V. Elektrotekhnologii: uchebnoe posobie / L.V. Kulikova, A.A. Bagaev. – Moskva; Berlin: ООО "Direktmedia Publishing", 2021. – 373 s.
- Bagaev, A.A. Elektrotekhnologii: uchebnoe posobie / A.A. Bagaev, A.I. Bagaev, L.V. Kulikova. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 320 s.
- Patent RU No. 2791097 C1 MКИ F22В 1/28, H05В 6/1. Nagrevatel zhidkosti: No. 2022116090: zaiavl. 14.06.2022: opubl. 02.03.2023 / A.A. Bagaev, S.O. Bobrovskii, A.M. Levin; zaiavitel, patentoobladatel Altaiskii gos. agrar. un-t. – 3 s.
- Patent RU 2772376 С1 МКИ H05В 6/10. Protochnyi induktsionnyi nagrevatel zhidkosti: No. 2021111496: zaiavl. 21.04.2021: opubl. 20.05.2022 / A.A. Bagaev, Ts.I. Kalinin,

S.O. Bobrovskii; zaiavitel, patentoobladatel Altaiskii gos. agrar. un-t. – 3 s.

5. Patent RU 2773671 C1 MKI H05B 6/10. Prochnyi induktsionnyi nagrevatel tekuchikh sred: No. 2021113043: zaiavl. 04.05.2021: opubl. 07.06.2022 / A.A. Bagaev, S.O. Bobrovskii; zaiavitel, patentoobladatel Altaiskii gos. agrar. un-t. – 3 s.

6. Bagaev, A.A. Metodika rascheta, otsenka energeticheskoi effektivnosti i napravleniia sovershenstvovaniia nizkotemperaturnykh induktsionnykh koaksialnykh nagrevatelei moloka promyshlennoi chastoty / A.A. Bagaev, S.O. Bobrovskii // Vestnik NGIEI. – 2023. – No. 7 (146). – S. 60-71.

7. Vedeniapin, G.V. Obschchaia metodika eksperimentalnogo issledovaniia i obrabotka opytnykh dannykh. – Moskva: Kolos, 1967.

8. Melnikov, S.V. Planirovanie eksperimenta v issledovaniiah selskokhoziaistvennykh protsessov / S.V. Melnikov, V.R. Aleshkin, P.M. Roshchin. – Leningrad: Kolos, 1980. – 168 s.

9. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnoe posobie / A.A. Bagaev, L.V. Kulikova, E.V. Kuzmin, V.N. Larionov, V.D. Mikheev, O.K. Nikolskii. – Barnaul: Izd-vo FGBOU VPO Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova, 2000. – 772 s.

10. Venikov, V.A. Teoriia podobiia i modelirovaniia (primenitelno k zadacham elektroenergetiki): uchebnik dlia vuzov / V.A. Venikov, G.V. Venikov. – Moskva: Vyssh.shk., 1984. – 439 s.



УДК 621.396
DOI: 10.53083/1996-4277-2024-235-5-78-83

Г.Н. Поляков, Н.Н. Аникиенко
G.N. Polyakov, N.N. Anikienko

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕРНА ИЗ СОЛОМЫ ПОЛЕВОЙ МАШИНЫ ДЛЯ СБОРА НЕВЕЯНОГО ВОРОХА

IMPROVING THE PROCESS OF GRAIN SEPARATION FROM THE STRAW OF A FIELD MACHINE FOR COLLECTING NOT WINNOWNED HEAPS

Ключевые слова: зерноуборочные комбайны, технология уборки, сбор невеяного вороха, зерно, солома, соломотряс, тонкослойная сепарация, кинематический режим, зональная сепарация.

В рыночных условиях рентабельное производство в аграрном секторе, особенно продукции растениеводства, из-за высоких цен на топливо и технику невозможно без применения ресурсосберегающих технологий. В приоритетном направлении развития аграрного производства ключевое место отводится уборке зерновых культур. Исследования комбайновой технологии

выявили ее недостатки: потери зерна в поле превышают агротехнические требования; солома теряется полностью; сложная конструкция уборочных машин и многочисленные технологические регулировки. Все это подтолкнуло к разработке ресурсосберегающих технологий уборки. Большого внимания заслуживает технология уборки со сбором невеяного вороха (мелкого зернового вороха). В качестве уборочного агрегата используется полевая машина, которая изготавливается на базе зерноуборочного комбайна. Предусматривается демонтаж с комбайна зернового бункера и сопутствующих ему транспортирующих устройств, решетного