

УДК 621.3.011

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и электроснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ НАГРЕВА КЕРАМИЧЕСКОГО РЕЗИСТОРА В ПО SIMINTECH

Цокур Дмитрий Сергеевич

к.т.н., доцент

[Web of Science Researcher ID AAE-3289-2019](#)

Scopus Author ID: 57209270248

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3291-810X>

РИНЦ SPIN-код: 1473-9680

dmitry_tsokur@mail.ru

Николаенко Сергей Анатольевич

к.т.н., доцент

Scopus Author ID: 56485924400

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9974-6667>

РИНЦ SPIN-код: 7921-7271

211521152115@mail.ru

Кубанский Государственный Аграрный университет имени И.Т.Трубилина, Краснодар, Россия

Косвенный электрический нагрев сопротивлением широко применяется в сельском хозяйстве для нагрева жидкостей и газов. Знание особенностей моделирования этого процесса важно для оптимизации нагрева и повышения эффективности технологических процессов в различных областях агропромышленного комплекса. В соответствии с этим рассмотрено разработку модели нагрева керамического резистора в отечественном ПО SimInTech. Показаны основные этапы моделирования: от процесса описания протекающих в объекте исследования процессов, описанных по средствам уравнений теплового баланса, до составления модели в используемой программной среде. Продемонстрированы возможности задания свойств воздуха путем вызова встроенных в ПО функций, а также с помощью собственных эмпирических зависимостей. При разработке моделей тепловых процессов возможна ситуация, при которой происходит деление одной из переменных на ноль. Это происходит из-за того, что во многих уравнения описывающих тепловые процессы присутствует разность температур, которые зачастую равны друг другу в начальный момент времени. В статье приведен вариант решения данной проблемы. Рассматриваемая модель может быть примером при моделировании нагревательных устройств, используемых не только в АПК, но и в отдельных отраслях промышленности

UDC 621.3.011

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

4.3.2. Electrical technologies, electrical equipment and power supply of the agro-industrial complex (technical sciences)

MODELING OF HEATING DEVICES BY THE EXAMPLE OF A MODEL HEATING OF A CERAMIC RESISTOR IN SIMINTECH SOFTWARE

Tsokur Dmitry Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, docent

[Web of Science Researcher ID AAE-3289-2019](#)

Scopus Author ID: 57209270248

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3291-810X>

RSCI SPIN-code: 1473-9680

dmitry_tsokur@mail.ru

Nikolaenko Sergey Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, docent

Scopus Author ID: 56485924400

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9974-6667>

RSCI SPIN-code: 7921-7271

211521152115@mail.ru

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Indirect electric heating by resistance is widely used in agriculture for heating liquids and gases. Knowledge of the modeling features of this process is important for optimizing heating and increasing the efficiency of technological processes in various areas of the agro-industrial complex. In accordance with this, we will consider the development of a model of heating a ceramic resistor in the domestic SimInTech software. The main stages of modeling are shown: from the process of describing the processes occurring in the object of study, described by means of heat balance equations, to compiling a model in the used software environment. The possibilities of setting air properties by calling functions built into the software, as well as using our own empirical dependencies are demonstrated. When developing models of thermal processes, a situation is possible in which one of the variables is divided by zero. This occurs due to the fact that many equations describing thermal processes contain a temperature difference, which are often equal to each other at the initial moment of time. The article provides a solution to this problem. The model under consideration can be an example in modeling heating devices used not only in the agro-industrial complex, but also in certain industries

Ключевые слова: НАГРЕВ, КЕРАМИЧЕСКИЙ РЕЗИСТОР, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА, SIMINTECH

Keywords: HEATING, CERAMIC RESISTOR, MATHEMATICAL MODEL, HEAT BALANCE EQUATION, SIMINTECH

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-202-041>

Косвенный электрический нагрев сопротивлением является часто используемым технологическим процессом в сельском хозяйстве [1]. Поэтому знание особенностей моделирования данного процесса крайне важно для оптимизации процессов нагрева жидкостей и газов в различных областях АПК. Рассмотрим математическую модель нагрева резистора. В качестве такового выберем керамический резистор С5-35В мощностью 10 Вт и сопротивлением 4,7 кОм. Процесс моделирования начнем с принятия некоторых допущений, а именно:

- 1) резистор расположен вертикально;
- 2) пренебрежем такими компонентами резистора, как обмотка и изоляционное покрытие и представим резистор как керамический объект, т.к. керамика занимает наибольший его объем;
- 3) пренебрежем рассмотрением процесса теплоотдачи от стенок внутренней полости резистора к воздуху, а также от горизонтальных верхних и нижних его поверхностей и будем считать, что весь процесс теплоотдачи тепла идет от вертикальных внешних стенок к воздуху;
- 4) вид теплообмена – свободная конвекция около вертикального цилиндрического тела;
- 5) движение воздуха, обдувающего резистор, примем ламинарным, а сам воздух сухим.

На первом этапе проведения моделирования необходимо математически описать исследуемые процессы. Согласно принятым нами допущениям, уравнение теплового баланса, описывающее нагрев резистора, будет выглядеть следующим образом [2, 3, 4]:

<http://ej.kubagro.ru/2024/08/pdf/41.pdf>

$$C_p m_p \frac{dT_p}{dt} = P_p - \Phi_{по}, \text{ где } \Phi_{по} = \alpha_p S_p (T_p - T_{ок}) \quad (1)$$

где C_p – теплоемкость керамики (резистора), Дж/(кг·К); m_p – масса керамики, кг; T_p – температура резистора, К; P_p – мощность, подводимая к резистору, Вт; $\Phi_{по}$ – тепловой поток от резистора в окружающую среду, Вт; α_p – коэффициент теплоотдачи от вертикальных внешних стенок резистора к воздуху, Вт/(м²·К), S_p – площадь поверхности с которой осуществляется теплоотдача, м²; $T_{ок}$ – температура окружающего воздуха, К.

Согласно методике представленной в [2, 3, 4] уравнение (1) после преобразований приводится к виду:

$$T \frac{dT_p}{dt} + T_p = k P_p + T_{ок}, \text{ где } T = \frac{C_p m_p}{\alpha_p S_p} \text{ и } k = \frac{1}{\alpha_p S_p} \quad (2)$$

где T – постоянная времени; k – коэффициент усиления.

И далее при преобразовании по Лапласу при нулевых начальных условиях могут быть получены две передаточные функции по мощности, подводимой к резистору W_1 и по температуре окружающего воздуха W_2 [2, 3, 4]:

$$W_1 = \frac{T_p}{P_p} = \frac{k}{Ts + 1} \text{ и } W_2 = \frac{T_p}{T_{ок}} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3)$$

Моделирование будем проводить в отечественной среде для динамического моделирования SimInTech. Температуру окружающего воздуха $T_{ок}$ примем равной 20°C. Согласно полученным передаточным функциям и уравнению (1) модель нагрева резистора в данном ПО будет иметь вид, показанный на рис. 1.

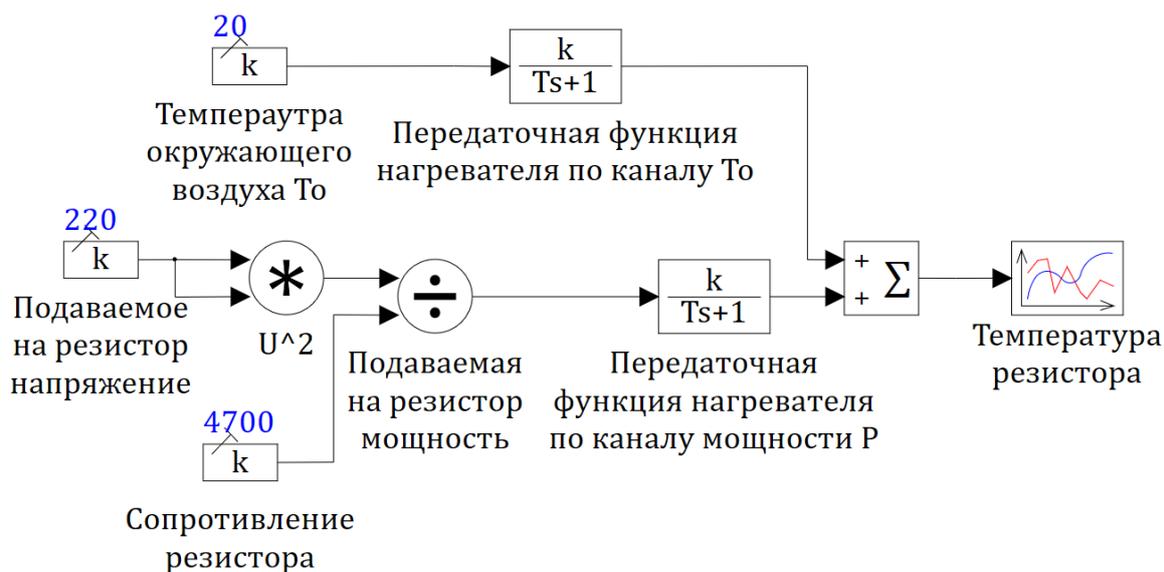


Рисунок 1 – Модель нагрева резистора в ПО SimInTech

Единственной неизвестной величиной в модели является коэффициент теплоотдачи α_p . Без него невозможно найти постоянную времени T и коэффициент усиления k . Принять его равным какому-либо усредненному значению будет неверно, так как данный коэффициент зависит от температуры. Для его нахождения обратимся к теории подобия. Для вертикально расположенной трубы данный коэффициент согласно [5, 6] будет равен:

$$\alpha_p = \overline{Nu} \frac{\lambda}{h} = C \cdot Ra^n \frac{\lambda}{h} = C \cdot \left(\frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \beta (T_p - T_{ок}) \cdot Pr \right)^n \cdot \frac{\lambda}{h} \quad (4)$$

где \overline{Nu} – средний коэффициент теплоотдачи или критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); h – высота резистора, м; C – коэффициент зависящий от режима течения среды и для принятого нами ламинарного течения равен 0,54; Ra – число Рэлея; n – степень также зависящая от режима течения среды и для нашего случая равная 1/4; g – ускорение свободного падения, 9,8 м²/с; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; β – коэффициент объёмного расширения воздуха, 1/К; Pr – число Прандтля.

Стоит учесть, что такие параметры воздуха в уравнении (4) как коэффициент кинематической вязкости ν , теплопроводность λ и число

Прандтля Pr зависят от так называемой определяющей температуры T_o . И для выбранного нами критериального уравнения (4) эта температура будет равна: $T_o = 0,5 \cdot (T_p - T_{OK})$.

Тогда модель процесса нагрева резистора в SimInTech представленная на рис. 1 может быть дополнена расчетом коэффициента теплоотдачи α_p (рис. 2).

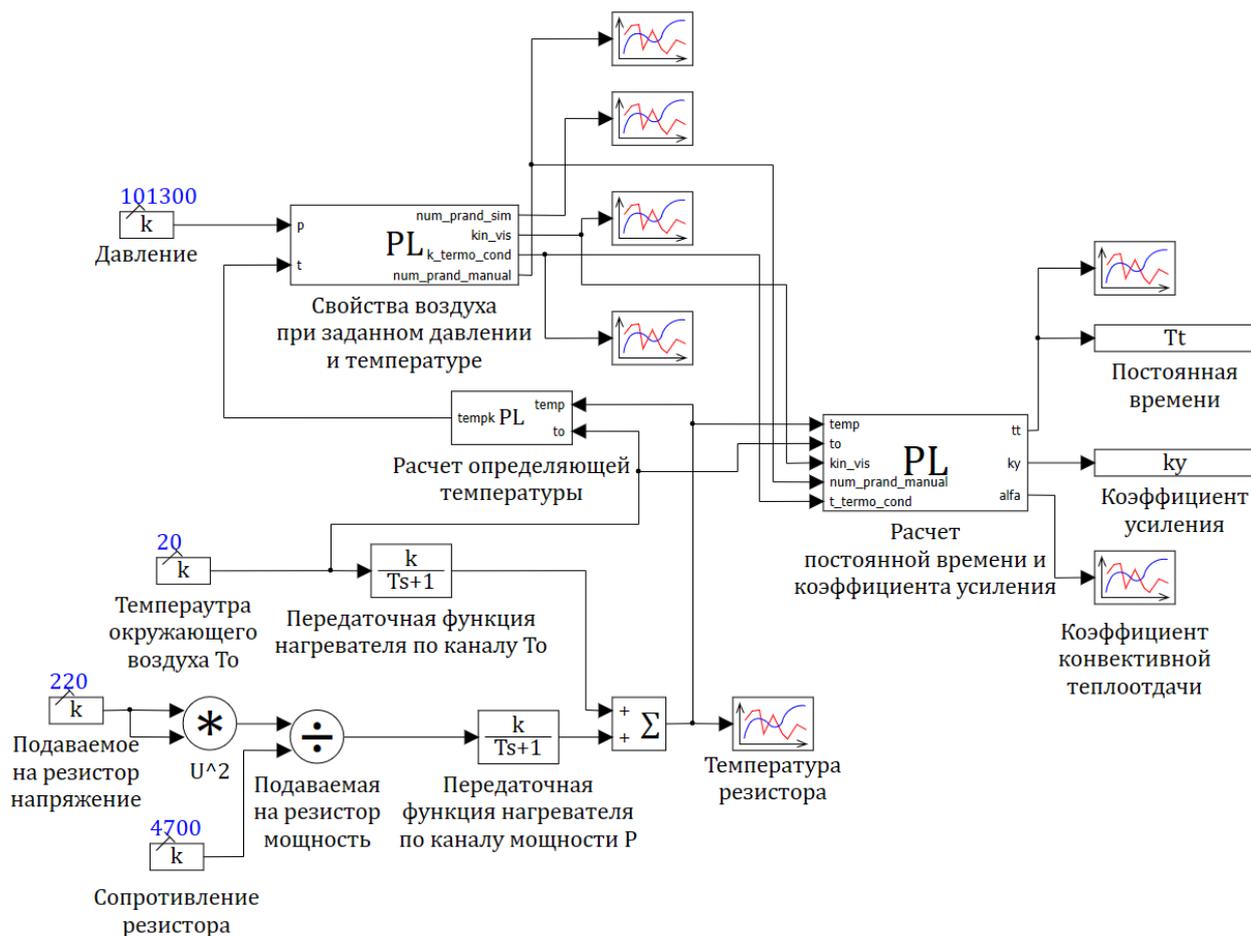


Рисунок 2 - Модель нагрева резистора в ПО SimInTech с учетом изменения коэффициента теплоотдачи

Температура окружающего воздуха T_{OK} и температура резистора T_p в модели используются, для расчета определяющей температуры T_o в соответствующем блоке, внутри которого реализуется простой расчет показанный на рис. 3.

```
input Temp, To;  
TempK=0.5*(Temp+To); //нахождение определяющей температуры  
output TempK;
```

Рисунок 3 – Расчет, производимый в блоке «Расчет определяющей температуры»

Полученное значение определяющей температуры T_o в модели используется для определения таких свойств воздуха, как коэффициент кинематической вязкости ν , теплопроводность λ и число Прандтля Pr . В SimInTech есть возможность подгрузить встроенную в ПО таблицу, в которой уже есть зависимости данных параметров от температуры и давления. Для этого используются встроенные функции «loadgas» и «getgasprop». Но при моделировании мы столкнулись с тем, что число Прандтля Pr изменялось не значительно и отличалось от известной зависимости этого числа для сухого воздуха (рис. 4).

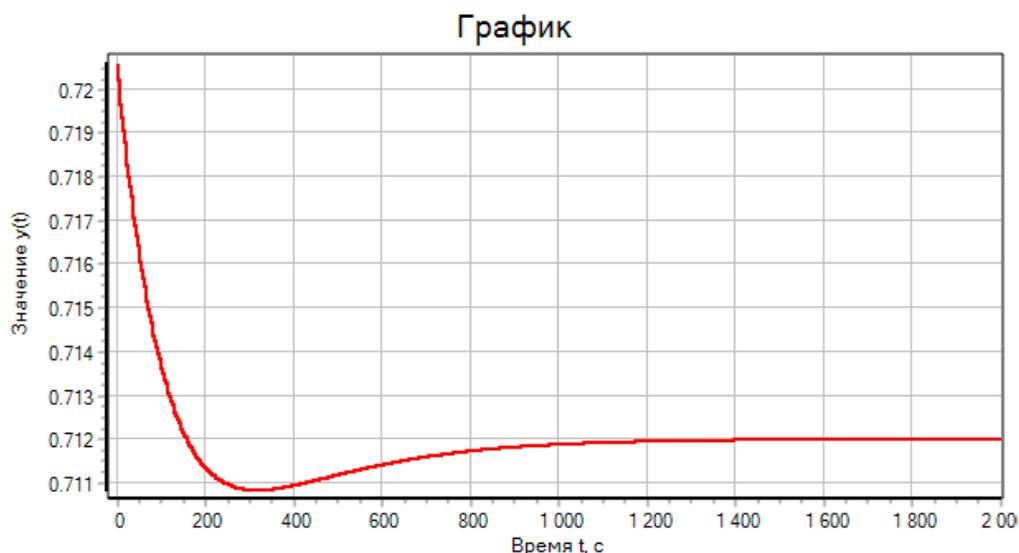


Рисунок 4 – График зависимости числа Прандтля Pr от температуры при моделировании рассматриваемой задачи с использованием, встроенной в ПО SimInTech таблицы

Поэтому в модели число Прандтля Pr рассчитывается на основании регрессионного уравнения, полученного нами в Excel для зависимости этого числа от температуры сухого воздуха (рис. 5).


```

1  input  p,t;
   output num_Prاند_Sim, kin_vis, k_термо_cond, num_Prанд_Manual;
   .
   initialization
   .   //Загружаем таблицу свойств газа
   .   gas_id=loadgas("Воздух_e4.tbl");
   . end;
   .
   .   din_vis=getgasprop(gas_id, p, t, 6, 2); //динамическая вязкость воздуха из загруженной таблицы
10  yd_V=getgasprop(gas_id, p, t, 4, 2); //удельный объём из загруженной таблицы
   .
   .   ro=1/yd_V; // расчет плотности воздуха через удельный объём
   .   kin_vis=din_vis/ro; //расчет кинематической вязкости воздуха
   .
   .   num_Prанд_Sim=getgasprop(gas_id, p, t, 5, 2); //число Прандтля из загруженной таблицы
   .   k_термо_cond=getgasprop(gas_id, p, t, 7, 2); //коэффициент теплопроводности из загруженной таблицы
   .   num_Prанд_Manual=-0.0000000000000000051*t^6+
   .   0.00000000000000214394*t^5-0.0000000000321437782*t^4+
   .   0.00000000185756901125*t^3-0.00000009454303811865*t^2-
20|  0.00016970961543795600*t+0.70584763171047200000 //эмпирическое уравнение для расчета числа Прандтля

```

Рисунок 6 – Расчеты, производимые в блоке «Свойства воздуха при заданном давлении и температуре»

Рассчитываемые значения кинематической вязкости ν , теплопроводности λ и числа Прандтля Pr поступают в блок «Расчет постоянной времени и коэффициента усиления». В данном блоке также заданы геометрические размеры резистора, коэффициент объемного расширения воздуха β , а также значения теплоемкости C_p и плотности керамики ρ . Также в блоке рассчитываются масса резистора, площадь его теплоотдающей поверхности S_p , коэффициент теплоотдачи α_p , постоянная времени T и коэффициент усиления k (рис. 7).

```

1  input Temp, To, kin_vis, num_Prанд_Manual, t_термо_cond;
   output Tt, ky, alfa;
   .   h=0.04; //высота вертикального цилиндра (резистора), м
   .   R=0.006; //радиус резистора (цилиндра), м
   .   B=0.00367; //коэффициент объемного расширения воздуха
   .   C=800; // теплоёмкость керамики, Дж/(кг*К)
   .   ro_ceramik=2500; //плотность керамики, кг/м^3
   .   V=pi*(R^2)*h-(pi*(0.003^2)*h); //объём резистора (цилиндра)
   .   m=V*ro_ceramik; //масса резистора
10  F=(2*pi*R*h); //площадь поверхности резистора (цилиндра), м^2
   .   if Temp-To=0 then Ra=6.7 else Ra=((9.8*(h^3)*B*(Temp-To))/(kin_vis^2))*num_Prанд_Manual; //расчет числа Рэлея
   .   Nu=0.54*(Ra^0.25); //расчет числа Нуссельта
   .   alfa=(Nu*t_термо_cond)/h; //расчет коэффициента конвективной теплоотдачи
   .   Tt=(C*m)/(alfa*F); //постоянная времени
   .   ky=1/(alfa*F); //коэффициент усиления

```

Рисунок 7 - Расчеты, производимые в блоке «Расчет постоянной времени и коэффициента усиления»

Стоит отметить одну особенность расчета. В начальный момент времени температура резистора T_p и температура окружающего воздуха T_{OK} равны. Это приводит к тому, что при расчете постоянной времени T и ко-

эфициента усиления k происходит операция деления на ноль, т.к. ему становится равно число Рэлея Ra . Для избегания этого в расчете предусмотрена логическая операция сравнения: «if Temp-To=0 then Ra=6.7 else Ra=((9.8*(h^3)*B*(Temp-To))/(kin_vis^2))*num_Prand_Manual;». Благодаря этому при условии равенства температур, задается конкретное значение числа Рэлея Ra равное 6,7. Данное число было получено при разнице температур равной 0,001 °С.

Рассчитанные постоянная времени T и коэффициент усиления k в качестве переменных поступают в передаточные функции нагревателя по мощности W_1 и температуре окружающего воздуха W_2 и таким образом происходит расчет температуры резистора T_p . Полученные результаты сравним с расчетом этой же задачи в другой среде моделирования – ComsolMultiphysics, которая основана на моделировании методом конечных элементов (рис. 8).

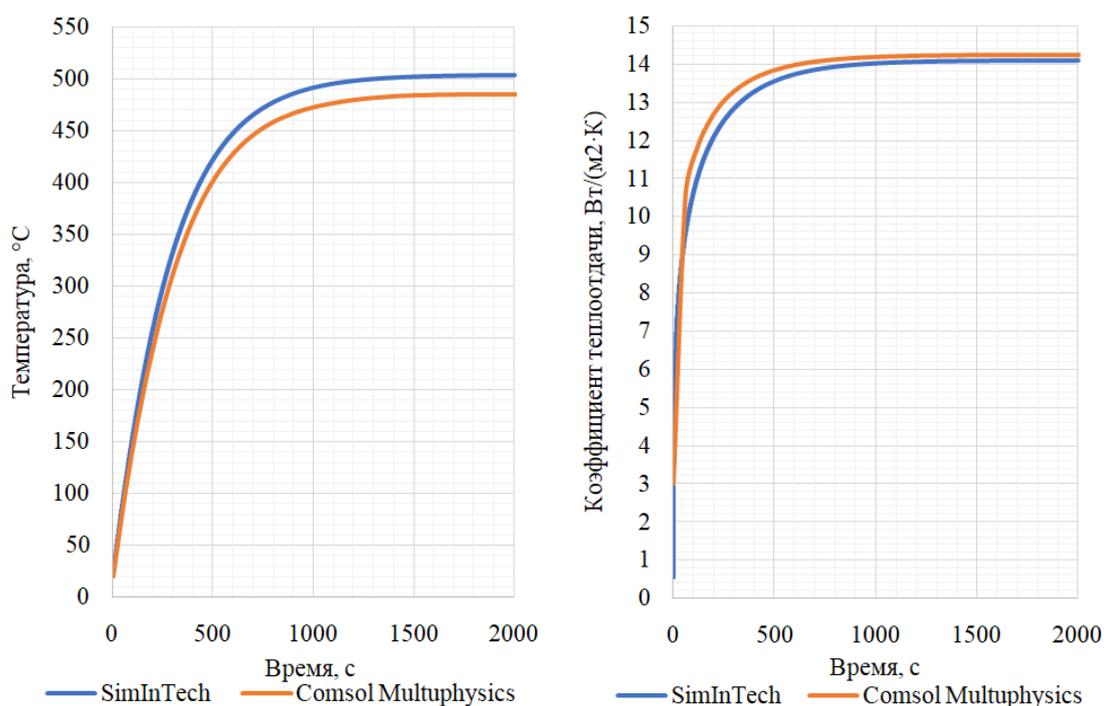


Рисунок 8 – Графики изменения температуры нагрева резистора T_p во времени (слева) и графики изменения при этом коэффициента теплоотдачи α_p (справа) в ПО SimInTech и в ПО ComsolMultiphysics

Решение одной и той же задачи в разных средах для моделирования дает почти один и тот же результат. При этом стоит отметить, что в ComsolMultiphysics для расчета теплоотдачи α_p от стенок вертикального цилиндра встроено другое критериальное уравнение, сильно отличающееся от используемого нами. Но при этом разница при расчете температуры резистора T_p и коэффициента теплоотдачи α_p не большая.

Таким образом, была получена модель нагрева резистора в отечественной среде моделирования SimInTech учитывающая изменение коэффициента теплоотдачи α_p . При этом были показаны различные нюансы, которые могут возникнуть при решении данной задачи. А именно: использование встроенных или же полученных самостоятельно зависимостей, а также ошибка деления на ноль при расчетах в которых фигурирует разность температур. Данная модель может быть использована при моделировании различных нагревательных устройств не только в АПК, но и в промышленности.

Список литературы

1. Багаев, А. А. Интенсификация теплообмена в цилиндрическом змеевиковом теплообменнике электронагревателя с косвенным способом теплопередачи / А. А. Багаев, С. О. Бобровский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5(199). – С. 127-131.
2. Карташов, Б.А. Системы автоматического регулирования: практикум по математическому моделированию / под ред. Б.А. Карташова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2015. – 458 с.
3. Карташов, Б.А. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении: учебное пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / под ред. Б.А. Карташова. – Ростов н/Д : Феникс, 2013. – 540 с.
4. Карташов Б.А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования : учебное пособие / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. — Москва : ДМК Пресс, 2017. — 424 с.
5. Бухмиров, В.В. Теплообмен: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
6. Бухмиров, В. В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Теплообмен» / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова; ГОУВПО «Иванов-

ский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 104 с.

References

1. Bagaev, A. A. Intensifikacija teploobmena v cilindricheskom zmeevikovom teploobmennike jelektronagrevatelja s kosvennym sposobom teploperedachi / A. A. Bagaev, S. O. Bobrovskij // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – № 5(199). – S. 127-131.

2. Kartashov, B.A. Sistemy avtomaticheskogo regulirovanija: praktikum po matematicheskomu modelirovaniju / pod red. B.A. Kartashova. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – Rostov n/D : Feniks, 2015. – 458 s.

3. Kartashov, B.A. Komp'juternye tehnologii i mikroprocessornye sredstva v avtomaticheskom upravlenii: uchebnoe posobie dlja studentov uchrezhdenij sred. prof. obrazovanija / pod red. B.A. Kartashova. – Rostov n/D : Feniks, 2013. – 540 s.

4. Kartashov B.A. Sreda dinamicheskogo modelirovanija tehniceskikh sistem SimInTech: Praktikum po modelirovaniju sistem avtomaticheskogo regulirovanija : uchebnoe posobie / B. A. Kartashov, E. A. Shabaev, O. S. Kozlov, A. M. Shhekaturov. — Moskva : DMK Press, 2017. — 424 s.

5. Buhmirov, V.V. Teplomassoobmen: Ucheb. posobie / FGBOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina». – Ivanovo, 2014. – 360 s.

6. Buhmirov, V. V. Spravochnye materialy dlja reshenija zadach po kursu «Teplomassoobmen» / V.V. Buhmirov, D.V. Rakutina, Ju.S. Solnyshkova; GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina». – Ivanovo, 2009. – 104 s.