

# Исследование особенностей теплообмена хлорбензола в электрическом поле нейросетевым моделированием

А.Р. Мухутдинов, М.Г. Ефимов

**Аннотация.** На основе исследований с использованием современных компьютерных технологий разработана нейросетевая модель, позволяющая установить влияние силы тока на характер зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности при разных частотах. Установлены некоторые особенности и закономерности теплообмена хлорбензола в электрическом поле.

**Ключевые слова:** моделирование, хлорбензол, теплообмен, высокочастотное электрическое поле, искусственная нейронная сеть.

## Введение

Использование электрического поля является эффективным способом интенсификации теплообменных процессов и применяется в тех случаях, когда традиционные способы оказываются неэффективными и не могут обеспечить желаемого результата. Уменьшение существующих поверхностей теплообмена, а, следовательно, габаритов и массы теплообменной аппаратуры возможно с помощью интенсификации теплообмена непосредственным наложением электрического поля, эффект от которого требует намного меньших затрат электрической мощности, нежели при использовании традиционных способов. Проблема, связанная с прямым воздействием электрического поля на хлорбензол и происходящие в нем процессы, является объектом исследования. Постоянные, переменные низкочастотные и высокочастотные электрические поля оказывают влияние на

процессы теплообмена в хлорбензоле. Прогнозирование эффектов воздействия электрического поля на теплообмен в хлорбензоле имеет большое прикладное значение.

Одним из наиболее прогрессивных методов изучения сложных систем является компьютерное математическое моделирование [1, 2]. Поэтому перспективным способом решения данной задачи является использование универсальных вычислительных возможностей современных программных средств, основывающихся на искусственных нейронных сетях (ИНС), обладающих широчайшими возможностями моделирования таких систем [3-7]. Они позволяют, исходя из одного только эмпирического опыта, строить нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных и позволяют выявлять ранее неизвестные и никогда не исследованные зависимости и закономерности, активно использовать их для решения конкретных практических задач.

## Объект исследования

Целью данной работы является разработка нейросетевой модели и ее применение для выявления новых зависимостей влияния высокочастотного электрического поля при разных частотах и силах электрического тока на коэффициент теплопроводности хлорбензола.

В работе исследуется относительное изменение коэффициента теплопроводности хлорбензола в электрическом поле.

Результат прогнозирования относительного изменения коэффициента теплопроводности ( $\lambda_e/\lambda$ ) с использованием компьютерной модели, основанной на ИНС, зависит от большого количества параметров. Поэтому по экспериментальным данным (16 опытов, [8]) создавалась база знаний при разных частотах ( $3 \div 6 \cdot 10^5$  Гц) (см. таблицу) в среде *MS Excel*, которая делилась на обучающую (11 примеров) и тестирующую (5 примеров) выборки. Значения экспериментальных данных вводились без предварительного отсева экспериментов. Входными данными для обучения являлись:

- в отсутствие электрического поля: термоэлектродвижущая сила ( $\Delta e$ , мВ), перепад температур в эталонном слое металла ( $\Delta T_{cm} \cdot 10^3$ ,  $^{\circ}C$ ), плотность теплового потока, направленного сверху вниз через слой жидкости ( $q$ , Вт/ $m^2$ ),

- в электрическом поле: частота электрического тока ( $f \cdot 10^5$ , Гц), средняя температура слоя жидкости ( $t_{cp}$ ,  $^{\circ}C$ ), ток между электродами ( $J$ , мА), напряженность ( $E \cdot 10^2$ , кВ/м), термоэлектродвижущая сила ( $\Delta e_e$ , мВ), перепад температур в эталонном слое металла при соответствующей термоэлектродвижущей силе ( $\Delta T_{cm,e} \cdot 10^3$ ,  $^{\circ}C$ ), плотность теплового потока, проходящего сверху вниз через слой жидкости ( $q_e$ , Вт/ $m^2$ ).

Выходным параметром является относительное изменение коэффициента теплопроводности ( $\lambda_e/\lambda$ ), которое определяет эффект влияния поля на теплопроводность хлорбензола. Этот параметр зависит от входных данных. Затем происходило обучение и тестирование нейронной сети. В программной среде разработки искусственной нейронной сети (ИНС) применялся процесс обучения "с учителем".

## Обсуждение результатов эксперимента

В ходе работы оптимизирована структура ИНС: определено общее количество скрытых слоев – 2 и количество нейронов в слоях соответственно: 90; 50, функция активации (сигмоидная функция) и метод оптимизации (модифицированный *ParTan*). Этот метод является улучшенной модификацией градиентного метода

База знаний для нейросетевого моделирования

№ опыта	$f \cdot 10^5$	$t_{cp}$	$\Delta e$	$\Delta e_e$	$\Delta T_{cm} \cdot 10^3$	$\Delta T_{cm,e} \cdot 10^3$	$q$	$q_e$	$E \cdot 10^2$	$J$	$\lambda_e/\lambda$
$f=3 \cdot 10^5$ Гц											
1	3	19,8	13,5	14,5	32,1	34,6	24,4	26,5	1,10	20	1,08
2	3	20,1	19	25	45,2	66,5	34,6	50,4	1,50	30	1,25
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	3	20,3	26	39,5	61,9	93,9	41	70,9	2,50	45	1,51
$f=5 \cdot 10^5$ Гц											
1	5	19,6	18	21	42,8	50	32,7	38,2	1,10	80	1,17
2	5	20,3	26,5	37,5	63,1	95,3	42,4	60,5	1,50	100	1,45
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	5	20,7	34	60	80,8	143	61,4	109	2,50	120	1,77
$f=6 \cdot 10^5$ Гц											
1	6	20	18	22	42,8	52,4	32,8	40	1,10	80	1,21
2	6	20,3	26,5	41	63,1	119,5	48,2	65,5	1,50	90	1,54
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	6	20,9	32	61,5	76,2	147	58	112	2,50	110	1,94

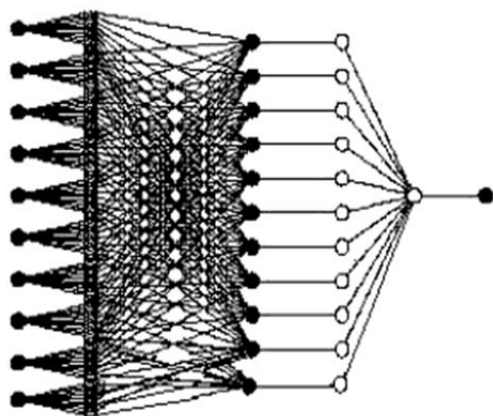


Рис. 1. Схема искусственной нейронной сети

(наискорейшего спуска) минимизации функции и используется для нахождения оптимальных значений весовых коэффициентов.

В соответствии с количеством входных и выходных параметров, количество нейронов в первом слое – 10, в последнем – 1 (Рис. 1). Общее число шагов обучения методом модифицированный Рунге составило 6210 шагов для выборки из 16 экспериментов.

После тестирования сеть показала максимальную относительную ошибку 6 %, что подтверждает возможность данной нейросетевой модели с наименьшей погрешностью прогнозировать относительное изменение коэффициента теплопроводности.

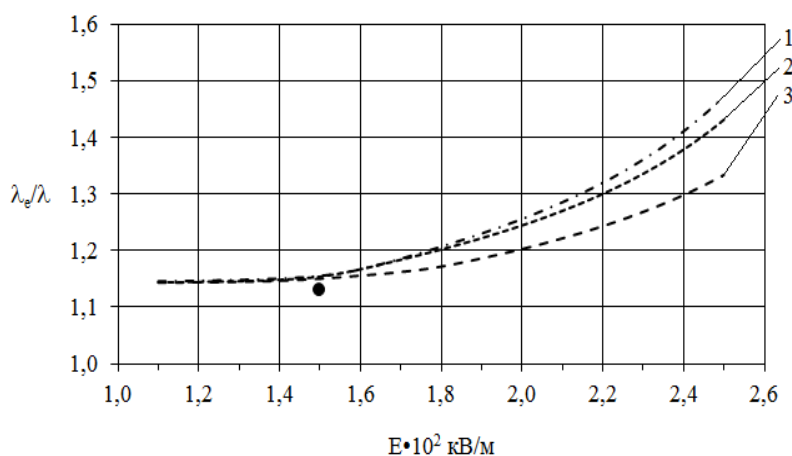
С применением разработанной модели были проведены следующие исследования:

- определен уровень значимости входных параметров по влиянию на относительное изменение коэффициента теплопроводности;

- получена зависимость относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля ( $\lambda_e/\lambda$ )= $f(E \cdot 10^2)$  при частотах ( $3 \div 6 \cdot 10^5$  Гц) и силе тока (от 20 до 120 мА);

- проведен анализ полученных результатов.

В ходе определения значимости влияния входных параметров на выходные было выявлено, что напряженность электрического поля по влиянию на относительное изменение коэффициента теплопроводности имеет максимальное значение, что согласуется с литературными данными [8]. Показатели значимости определяют дальнейший ход исследования, поэтому исследовалось влияние напряженности электрического поля на относительное изменение коэффициента теплопроводности. Поскольку напряженность является регулируемым при исследовании в системе эксплуатационным параметром, остановимся подробнее на нем. График зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля ( $\lambda_e/\lambda$ )= $f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $3 \cdot 10^5$  Гц и силе тока (от 20 до 45 мА) представлен на Рис. 2.

Рис. 2. График зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля при частоте  $3 \cdot 10^5$  Гц

1, 2 и 3 - кривые, полученные на основе нейросетевой модели при силе тока, соответственно: 20 мА, 30 мА и 45 мА  
● - экспериментальная точка

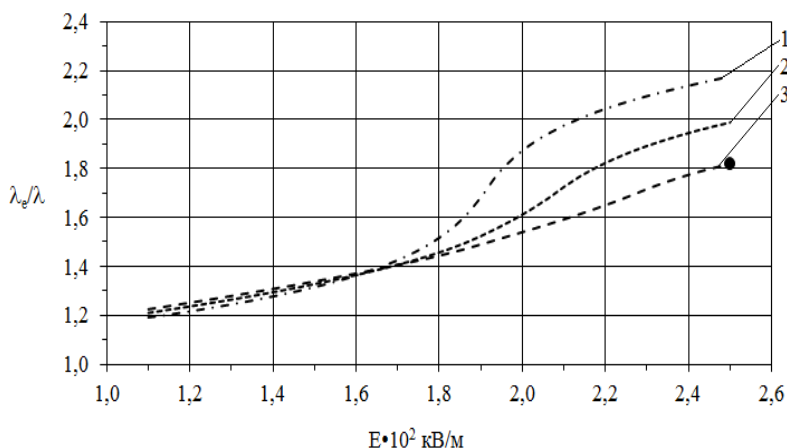


Рис. 3. График зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля при частоте  $5 \cdot 10^5$  Гц

1, 2 и 3 - кривые, полученные на основе нейросетевой модели при силе тока, соответственно: 20 мА, 100 мА и 120 мА  
 ● - экспериментальная точка

Зависимость  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $3 \cdot 10^5$  Гц имеет линейный характер, где во всем изученном диапазоне данных наблюдается рост относительного изменения коэффициента теплопроводности при увеличении напряженности электрического поля. При уровне напряженности  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м с уменьшением силы тока наблюдается увеличение значения  $(\lambda_c/\lambda)$  на  $9 \div 10$  % (с 1,33 до 1,45).

Далее рассмотрим график зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $5 \cdot 10^5$  Гц и силе тока (от 80 до 120 мА), представленный на Рис. 3.

При построении зависимости  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $5 \cdot 10^5$  Гц картина меняется:

- на характер зависимости  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  оказывает влияние уровень силы тока (так, при силе тока 120 мА характер линейный, а при силе тока 80 мА наблюдается возрастание зависимости); при уровне напряженности  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м с уменьшением силы тока наблюдается увеличение значения  $(\lambda_c/\lambda)$  на  $28 \div 29$  % (с 1,8 до 2,18);

- отмечается резкий рост значения относительного изменения коэффициента теплопроводности с 1,5 до 1,9 (на 33 %) в диапазоне от  $1,8$  до  $2,0 \cdot 10^2$  кВ/м напряженности электрического поля при силе тока 80 мА, а также с 1,6

до 1,85 (на 16 %) в диапазоне от  $2,0$  до  $2,2 \cdot 10^2$  кВ/м при силе тока 100 мА;

- максимальное значение относительного изменения коэффициента теплопроводности равно 2,18 отмечается при напряженности электрического поля  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м.

Затем строится график зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $6 \cdot 10^5$  Гц и силах тока (80 ÷ 110 мА) представлен на Рис. 4.

При построении зависимости  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частоте  $6 \cdot 10^5$  Гц наблюдается картина:

- характер зависимости  $(\lambda_c/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  сильно зависит от силы тока (при силе тока 110 мА наблюдается малая зависимость, а при токах 80 и 100 мА зависимость резко увеличивается, начиная с напряженности электрического поля  $1,7 \cdot 10^2$  кВ/м). При уровне напряженности  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м, с уменьшением силы тока наблюдается увеличение значения  $(\lambda_c/\lambda)$  на 48 % (с 1,5 до 2,22). Необходимо отметить, что характер изменения кривых схож с динамической петлей гистерезиса, когда рост частоты переменного тока приводит к увеличению ширины петли;

- отмечается резкий рост значения относительного изменения коэффициента теплопроводности с 1,65 до 2,22 (на 26 %) в диапазоне от  $2,0$  до  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м напряженности электриче-

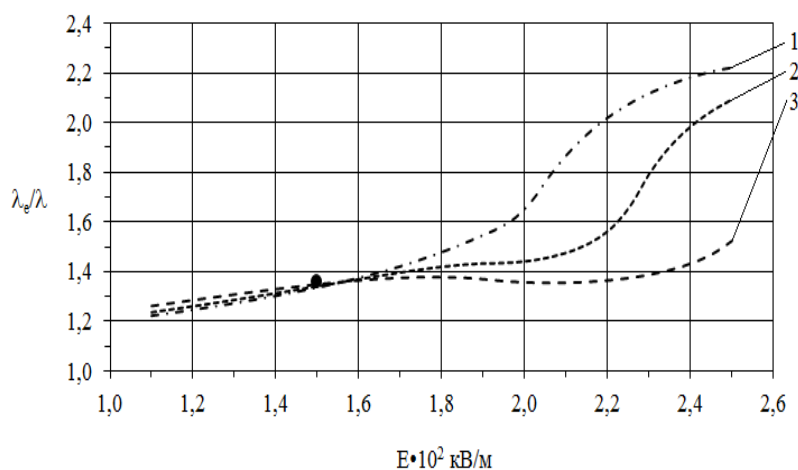


Рис. 4. График зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля при частоте  $6 \cdot 10^5$  Гц

1, 2 и 3 - кривые, полученные на основе нейросетевой модели при силе тока, соответственно: 80 мА, 90 мА и 110 мА  
 ● - экспериментальная точка

ского поля при силе тока 80 мА, а также с 1,55 до 2,1 (на 26 %) в диапазоне от 2,2 до  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м при силе тока 90 мА;

- максимальное значение относительного изменения коэффициента теплопроводности равно 2,22 отмечается при напряженности электрического поля  $2,5 \cdot 10^2$  кВ/м.

Таким образом, на основании вычислительного эксперимента с разработанной нейросетевой моделью установлено влияние значения силы тока на характер зависимости  $(\lambda_0/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при разных частотах.

## Заключение

1. Разработана методика решения задач прогнозирования теплообмена хлорбензола в электрическом поле с использованием программного средства на основе искусственных нейронных сетей.

2. Изучена и показана возможность нейросетевого моделирования теплообмена хлорбензола в электрическом поле. Наглядно продемонстрирован прогноз выходного параметра, в данном случае, относительного изменения коэффициента теплопроводности, на заранее обученной сети с относительной погрешностью, равной 6 %, с помощью базы знаний. Проведен сравнительный анализ полученной зависимости.

3. Разработана нейросетевая модель теплообмена хлорбензола в электрическом поле, на основании которой впервые получена зависимость относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля  $(\lambda_0/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$  при частотах  $(3 \div 6 \cdot 10^5$  Гц) и силе электрического тока (от 20 до 120 мА).

4. Установлено, что при увеличении частоты и уменьшении силы электрического тока меняется характер зависимости  $(\lambda_0/\lambda)=f(E \cdot 10^2)$ . Следует также отметить, что рост значения относительного изменения коэффициента теплопроводности от напряженности электрического поля при увеличении частоты в полярной жидкости (хлорбензол) определяется значениями их диэлектрической и магнитной проницаемости и электропроводности.

## Литература

1. Mukhutdinov A.R. Application of a neural network model for revealing specific features and regularities of solid fuel burning process / Mukhutdinov, A.R., Lyubimov P.E. / Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika) 57 (4), 2010, pp.336.
2. Mukhutdinov A.R. Development of a neural network programming module for predicting the strength properties of solid fuel / Mukhutdinov, A.R., Okulin M.V. / Chemical and Petroleum Engineering 47 (3), 2011, pp.266.
3. Мухутдинов А.Р. Нейросетевое моделирование теплообмена в бензоле при частоте 600 кГц / А.Р. Мухутдинов,

- З.Р. Вахидова, М.А. Хакимова / Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013 – Т.18, № 3. – С. 96-99.
4. Мухутдинов А.Р. Компьютерное моделирование теплообмена в бензоле / А.Р. Мухутдинов, З.Р. Вахидова, М.А. Хакимова / Вычислительные технологии. – 2014 – Т.19, №2. С.107-113.
  5. Мухутдинов А.Р. Нейросетевое прогнозирование и управление эксплуатационными параметрами процесса горения топлива на тепловых электрических станциях / А.Р. Мухутдинов / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. №7-8. С.84-89.
  6. Мухутдинов А.Р. Нейросетевое моделирование и оптимизация сложных процессов и наукоемкого теплоэнергетического оборудования / А.Р. Мухутдинов, Г.Н. Марченко, З.Р. Вахидова / Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 296 с.
  7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
  8. Савиных Б.В. Свойства переноса диэлектрических жидкостей и тепло-массообмен в электрических полях / Б.В. Савиных, Ф.М. Гумеров. – Казань.: ФЭн, 2002. – 384 с.

**Мухутдинов Аглям Рашидович.** Профессор кафедры «Технология твердых химических веществ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский научный исследовательский технологический университет». Доктор технических наук. Автор более 190 печатных работ. Область научных интересов: интеллектуальное компьютерное моделирование сложных процессов и наукоемких техносистем; разработка интеллектуального математического и программного обеспечения автоматизированных систем управления и проектирования объектов энергетики; исследование особенностей и закономерностей процесса горения твердого топлива, изучение механизма процесса горения и управление его эксплуатационными параметрами. E-mail: muhutdinov@rambler.ru.

**Ефимов Максим Геннадьевич.** Магистрант кафедры «Технология твердых химических веществ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский научный исследовательский технологический университет» Область научных интересов: компьютерное моделирование сложных процессов, исследование особенностей и закономерностей. E-mail: jero07@bk.ru.