

УДК 638.141

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЧЕЛИНОМ УЛЬЕ С ЭЛЕКТРОПОДОГРЕВОМ

© 2020 г. С.В. Оськин, Д.А. Овсянников

Кубанский государственный аграрный университет им. академика И.Т. Трубилина,
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13

E-mail: kgauet@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 18.11.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Чтобы помочь пчелам легче преодолеть периоды резкого похолодания и сократить потребление меда пчелиной семьей, применяют электрический обогрев ульев. Однако недостаточность знаний по поведению зимней агрегации пчел приводит иногда к гибели семьи или повышенному расходу меда. В работе приводятся результаты моделирования физических процессов в улье с помощью программного обеспечения Comsol 5.3. Моделирование происходило как при фиксированной наружной температуре с переменной мощностью нагревателей, так и при фиксированных мощностях нагревателей и переменной температуре окружающего воздуха. Анализ термограмм показал, что при включении нагревателей зоны с максимальной температурой в клубе смещаются в нижнюю его часть, что объяснимо с биологической точки зрения. Также видно, что при включенных нагревателях положительные температуры занимают больший объем внутри улья и, следовательно, для пчел есть лучшая возможность перехода на новые кормовые запасы, что особенно важно в весенний период. В результате моделирования установлено, что при низких температурах пчелы сокращают выделение энергии с 3600 Вт/м^3 до 1900 Вт/м^3 , т. е. почти в два раза. Такое сокращение выделяемой мощности пчелами приведет и к сокращению потребления ими меда. Еще одним этапом моделирования была оптимизация подводимой мощности к нагревателям по критериям минимального колебания температуры внутри улья и недопустимости перегрева нагревателей.

Ключевые слова: пчела, улей, температура, моделирование, электрический обогрев.

DOI: 10.31857/S0006302920010222

Многими исследователями доказаны терморегуляторные способности зимнего клуба пчел [1–5]. В то же время установлено, что для поддержания комфортной температуры пчелы используют медовые запасы улья. Если меда в улье недостаточно, то пчелы могут погибнуть. Для сокращения потребления кормовых запасов пчелиной семьей и преодоления периодов с резкими похолоданиями применяют электрические обогреватели. Для пчеловодов на рынке можно увидеть большое количество разнообразного оборудования, предназначенного для обогрева ульев в зимний период. Однако сегодня нет полной уверенности в том, что при использовании электрических подогревателей пчелы успешно перезимуют. Так, применение электрообогрева может привести к чрезмерному повышению температуры в улье, и тогда у пчел значительно ускорится метаболизм [6]. Такое состояние провоцирует раннюю закладку яиц пчелиной маткой, что при похолоданиях увеличивает подмор или даже приво-

дит к гибели пчелиной семьи. В это же время семьи без подогрева успешно зимовали. Некоторые пчеловоды говорят, что применение обогрева привело к повышенному расходу меда и к небольшому эффекту по подмору. Также нужно отметить, что все это сопровождается расходом электроэнергии и неудобствами в обслуживании – прокладка проводов, установка нагревателей и т. д. Другая часть пчеловодов приводит данные о хорошей зимовке пчел и выходе из зимы сильных семей с большим количеством расплода. Такие неоднозначные данные говорят о недостаточной изученности поведения пчел зимой и связанной с этим неадекватной регулировкой режимов обогрева.

Несмотря на большие трудности измерения параметров микроклимата в улье и внутри зимнего клуба, имеются попытки по разработке и установке различных датчиков [7, 8]. В последнее время появились программные продукты, которые позволяют смоделировать основные теплофизи-

ческие процессы, протекающие в улье. При этом необходимо правильно подобрать геометрию улья, сформулировать адекватную целевую функцию и принять правомочные ограничения. Моделированию тепловых процессов посвящали свои работы В.А. Тобоев, Е.К. Еськов, М.С. Толстов [9–11]. В Кубанском ГАУ также занимаются исследованием поведения пчел и моделированием физических процессов в среде Comsol [12, 13]. На основании полученных решений математических моделей были обнаружены критические зоны в ульях, определены основные теплофизические характеристики зимнего клуба пчел и их зависимости от параметров окружающей среды. Были проанализированы воздухообмен улья и, отдельно, зимней агрегации пчел. Все это привело к выводу о необходимости применения локального электрообогрева с дифференцированным регулированием подводимой мощности. Таким образом, возникает цель исследования – провести моделирование микроклимата в пчелином улье с

электрообогревателями и установить рациональные параметры и режимы работы системы управления.

МОДЕЛЬ

В предыдущей работе [12] авторами был проведен анализ физических процессов, протекающих в улье, на примере семьи скоплением 15000 пчел, расположенных в двенадцатипрамочном улье дадановского типа. Моделирование проводили в пакете Comsol с применением интерфейсов «Heat Transfer», «Transport of Diluted Species» «Laminar Flow», необходимые параметры которых объединялись через мультифизические связи. Для исследования состояния микроклимата зимней агрегации пчел с применением электрообогрева тепловая модель была дополнена необходимыми функциональными характеристиками и стала иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \rho_{\text{air}1} \cdot c_{\text{air}1} \cdot u_{\text{air}1} \cdot \nabla T + \rho_{\text{air}2} \cdot c_{\text{air}2} \cdot u_{\text{air}2} \cdot \nabla T + \rho_{\text{el h}} \cdot c_{\text{el h}} \cdot u_{\text{air}1} \cdot \nabla T + \nabla q_{\text{air}1} + \nabla q_{\text{air}2} + \\ \nabla q_{\text{wood}} + \nabla q_{\text{hc}} + \nabla q_{\text{empty hc}} + \nabla q_{\text{bee}} \text{Nu} + \nabla q_{\text{el h}} = Q_{\text{bee}} + Q_{\text{el h}}, \\ \lambda_{\text{bee}} = 0,0076 - 0,0017 \cdot T_0; \rho_{\text{пч}} = 243 - 8 \cdot T_0, \\ Q_{\text{bee}} = 3,2 \cdot T_0^2 - 20 \cdot T_0 + 922, \\ q_i = -\lambda_i \Delta T, \\ Q_{\text{el h}} = f(T_{\text{out}}), \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{air}1}$ и $\rho_{\text{air}2}$ – плотности воздуха, поступающего соответственно снаружи (индекс 1) и проходящего через пчелиный клуб (индекс 2); $c_{\text{air}1}$ и $c_{\text{air}2}$ – соответственно теплоемкости воздуха первого и второго воздушных блоков (внутреннего воздуха и воздуха внутри клуба); $u_{\text{air}1}$ и $u_{\text{air}2}$ – соответственно поля скоростей первого и второго воздушных блоков, м/с; $q_{\text{air}1}$, $q_{\text{air}2}$, q_{wood} , q_{hc} , $q_{\text{empty hc}}$, q_{bee} – соответственно плотности теряемых тепловых потоков путем теплопроводности воздушных блоков 1 и 2, деревянных элементов, медовых сот, пустых сот, пчелиного клуба, Вт/м²; T – текущее значение температуры (переменный параметр); T_0 – температура окружающего воздуха, контролируемая пчелами; T_{out} – температура наружного воздуха за ульем; λ_{bee} – коэффициент удельной теплопроводности агрегации пчел; $\rho_{\text{пч}}$ – плотность агрегации пчел; q_i и λ_i – соответственно плотности тепловых потоков и теплопроводности i -х составляющих объекта исследования (элементы улья и агрегация пчел); Nu – число Нуссельта; $\rho_{\text{el h}}$ и $c_{\text{el h}}$ – соответственно плотность и теплоемкость электронагревателя; $q_{\text{el h}}$ – плотность теряемого электронагревателем теплового потока пу-

тем теплопроводности; Q_{bee} – удельная тепловая мощность, воспроизводимая пчелами; $Q_{\text{el h}}$ – интенсивность тепловыделения электронагревателя.

Остальные разработанные модели – движения воздуха и влажности – оставались без изменения, как в предыдущей работе [12]. Была изменена геометрическая модель улья – добавлены три пленочных нагревательных элемента (рис. 1). Известно, что размер зимнего клуба пчел зависит от температуры наружного воздуха [14]. Используя приведенную в работе [12] зависимость плотности пчел от температуры, изменяли и геометрические размеры клуба.

Как видно из рис. 1, нагреватели располагались на дне улья с небольшим воздушным зазором для прохода воздуха. Решение моделей проводили с учетом мультифизических связей между отдельными интерфейсами. В ходе моделирования вычисляли температуру, скорость воздуха и концентрацию влаги во всех точках улья и внутри агрегации пчел. Геометрические параметры улья и его конструктивных элементов брали по размерам дадановского улья с двенадцатью рамками. Геометрические размеры зимней агрегации пчел

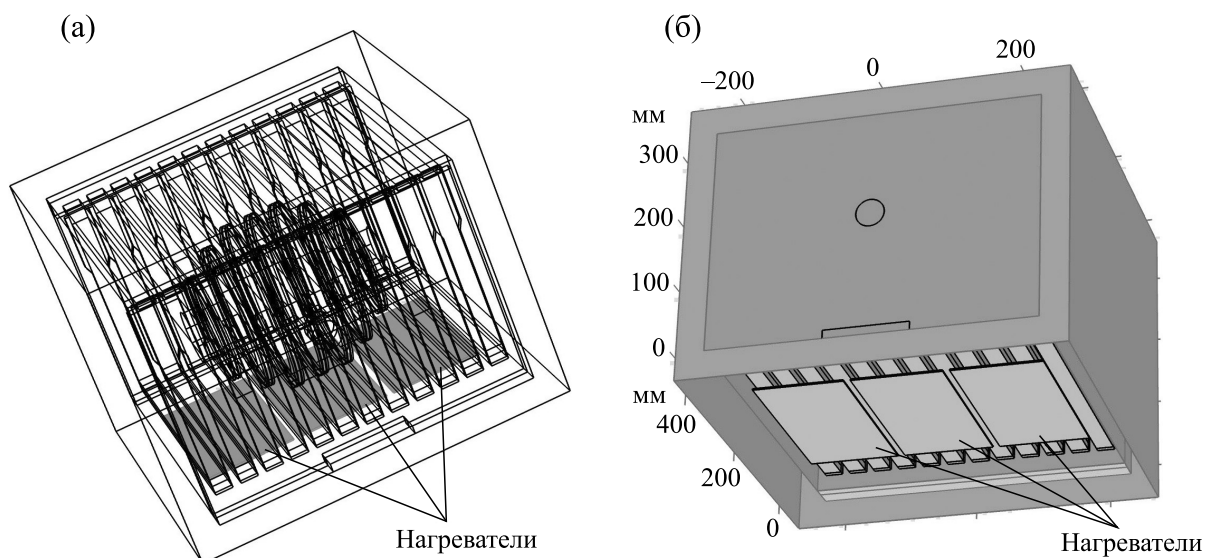


Рис. 1. Геометрия улья с установленными электрическими нагревателями.

были взяты на основе средней геометрии клуба с количеством пчел в 15000 особей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование проводили в два этапа: при фиксированной наружной температуре окружающего воздуха T_{out} (-25°C) и переменной тепловой мощностью, подводимой к нагревателям $Q_{el h}$; при фиксированных мощностях в нагревателях и переменной температуре окружающего воздуха T_{out} (принималась от 0°C до -30°C). В качестве температуры T_0 принимали температуру поверхностей нижних частей сотовых рамок, так как здесь имелось наибольшее соответствие с температурой окружающего клуба воздуха.

Моделирование по первому варианту проводили с изменением мощности первого (центрального) нагревателя от 0 до 5 Вт с шагом 1 Вт; второго нагревателя — от 0 до 10 Вт с шагом 2 Вт (второй нагреватель состоял из двух боковых). Первоначально сравнивали изображения температурных полей в улье с нагревателями и без них (рис. 2). При этом выделяемая тепловая мощность центрального нагревателя равна 5 Вт, а суммарная тепловая мощность двух боковых нагревателей — 10 Вт. Из рис. 2 видно, что при включении нагревателей зоны с максимальной температурой в клубе смещаются в его нижнюю часть, что объяснимо с биологической точки зрения и соответствует действительности. Также видно, что в клуб теперь поступает теплый воздух.

Анализ изображений температур вдоль улья (рис. 3) показывает, что при включенных нагревателях внутри улья положительные температуры

занимают больший объем и, следовательно, у пчел появляется возможность перехода на новые кормовые запасы.

В результате моделирования установлено, что при максимальной мощности нагревателей (15 Вт) их удельная мощность составляет около 74000 Вт/м^3 ($Q_{el h}$) и пчелы сокращают выделение энергии с 3600 Вт/м^3 до 1900 Вт/м^3 (Q_{bee}), т. е. почти в два раза. Такое сокращение выделяемой мощности пчелами приведет и к сокращению потребления ими меда.

Исследования полученных результатов показывают, что если нет обогрева, то и пчелы выделяют энергию из расчета температуры окружающего клуба воздуха, т. е. близкой к значениям температуры вне улья. Таким образом, выделение тепловой энергии нагревателями дает возможность сократить выделение тепла пчелами. Естественно, это приведет к понижению потребления кормовых запасов пчелами и меньшему забиванию кишечника, что является существенным фактором выживаемости насекомых при длительной зиме.

После проведения нескольких итераций по изменению мощности нагревателей получены средние значения подводимой к ним мощности (табл. 1).

Начиная с температуры -15°C , мощность нагревателей принимали постоянной с точки зрения облегчения регулирования. При таких значениях выделяемой тепловой мощности внутри улья температура внутри клуба держится в диапазоне от $+24^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ и на краях клуба температура находится на уровне $+12^{\circ}\text{C}$, что вполне допустимо. Однако отмечено, что при большом диа-

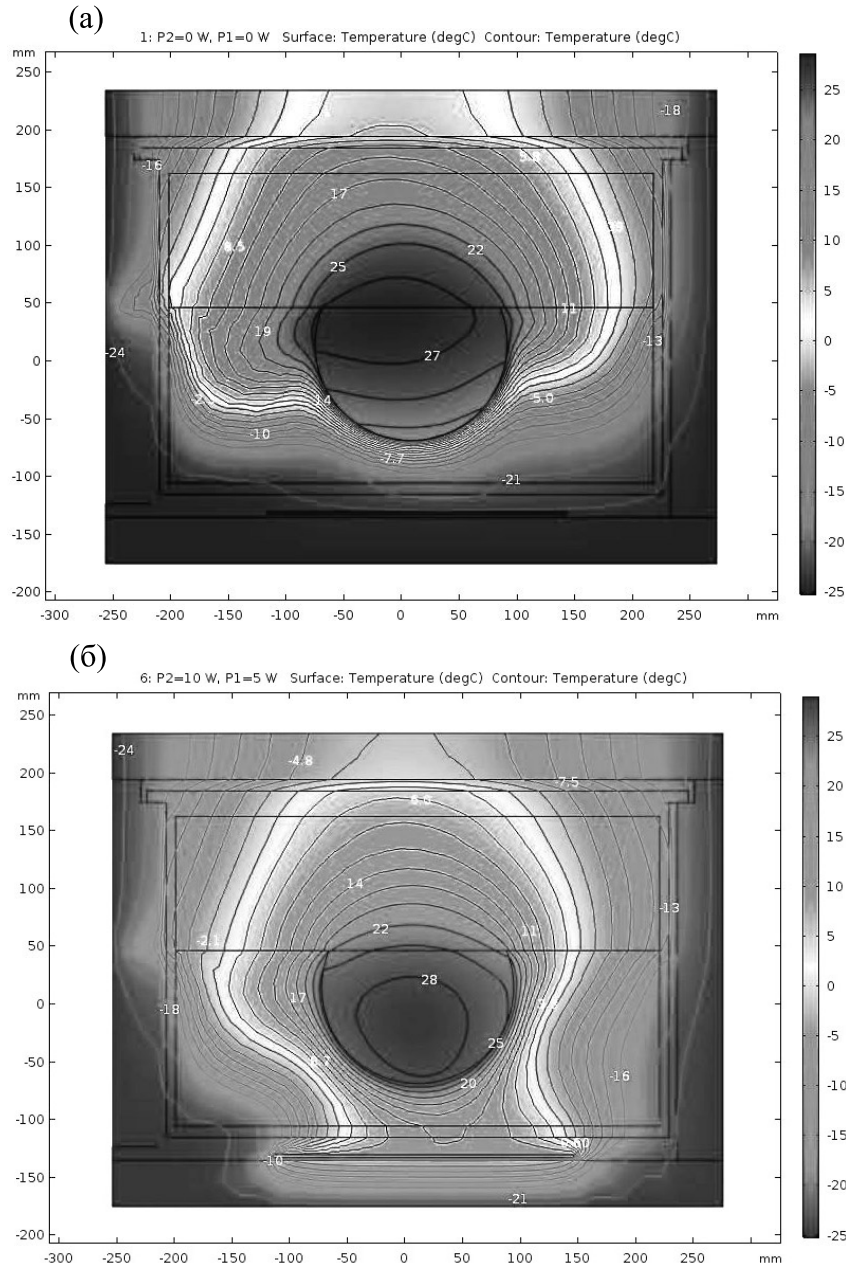


Рис. 2. Изображения температурных полей в разрезе клуба пчел: (а) – с выключенными нагревателями, (б) – с включенными нагревателями. P1 – значение выделяемой тепловой мощности центральным нагревателем, P2 – значение суммарной тепловой мощности, выделяемой двумя боковыми нагревателями.

пазоне изменения наружной температуры сохраняются также и колебания температуры внутри улья. Любые изменения наружной температуры беспокоят пчел, они начинают волноваться и пытаться подстроить свое поведение под ситуацию, проводить адекватные действия. Резкое повышение температуры приводит к провокации пчел на выход из улья, распаду зимнего клуба, что приводит к гибели большого количества особей, а

то и всей семьи. В случае понижения окружающей температуры пчелы начинают усиленно потреблять корм (что приводит к быстрому забиванию кишечника пчел) и сокращать площадь наружной поверхности клуба. Это, в свою очередь, может привести к тому, что часть пчел останется за пределами клуба, и они погибнут, или окажутся в месте, где осталось очень мало меда, и не смогут перейти к полномедным рамкам. Наилучший

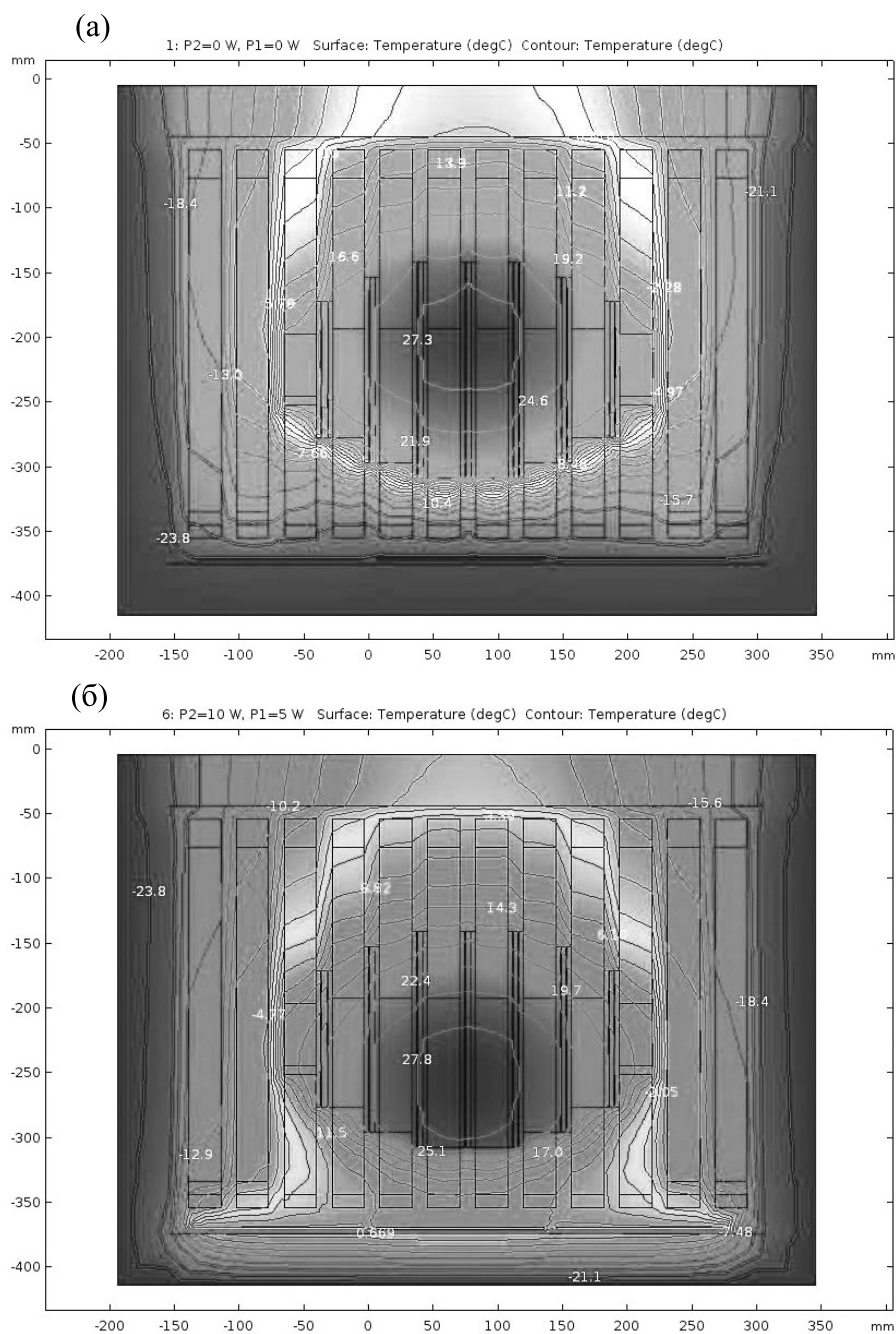


Рис. 3. Изображения температурных полей в разрезах через центр улья: (а) – при отключенных нагревателях, (б) – при включенном нагреве ($P_1 = 5$ Вт, $P_2 = 10$ Вт).

вариант — когда колебания температуры внутри улья будут минимальны, в пределах $2-3^{\circ}\text{C}$, тогда пчелы будут находиться в стабильном и спокойном состоянии. Таким образом, необходимо подобрать мощность нагревателей так, чтобы при довольно широком интервале изменения температуры окружающего воздуха внутри улья (вокруг

клуба) температура воздуха изменялась бы в максимально узком диапазоне или вообще была бы постоянной.

Следующим этапом моделирования была оптимизация подводимой мощности нагревателей. В результате нескольких итераций было определено оптимальное значение мощностей нагрева-

Таблица 1. Значения мощностей нагревателей при разных температурах окружающего воздуха (T_{out})

Наименование показателей	Значения показателей						
Температура, °C	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
Мощность нагревателя P1, Вт	3	4	4	5	5	5	5
Мощность нагревателей P2, Вт	6	8	8	10	10	10	10

Таблица 2. Значения оптимальных мощностей нагревателей при разных температурах окружающего воздуха (T_{out})

Наименование показателей	Значения показателей						
Температура, °C	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
Мощность нагревателя P1, Вт	1.6	3.6	5.9	8	9.5	10.5	11.5
Мощность нагревателей P2, Вт	3.26	7.2	11.8	16	19	21	23

телей по критериям минимального изменения температуры, контролируемой пчелами, и недопустимости перегрева нагревателей (табл. 2).

На рис. 4 представлены зависимости мощностей тепла, создаваемые пчелами и нагревателями, а также температурные графики нагревателя

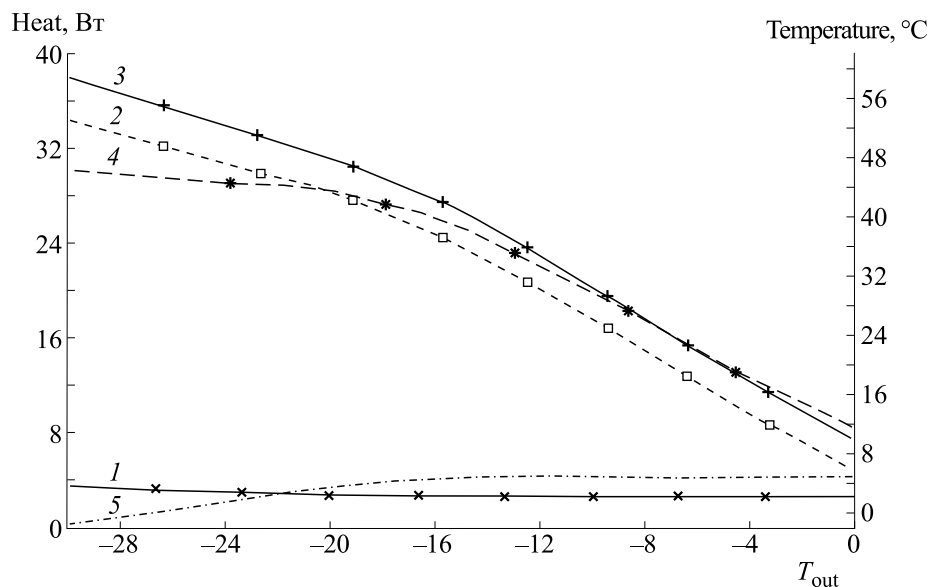


Рис. 4. Графики зависимости тепловых мощностей (Heat), выделяемых пчелами и нагревателями, от наружной температуры (T_{out}); зависимости температуры (Temperature) поверхностей нагревателей и температуры рамок, контролируемой пчелами, от наружной температуры (T_{out} , правая ось): 1 — максимальная тепловая мощность, генерируемая пчелами в клубе; 2 — максимальная тепловая мощность, выделяемая нагревателями; 3 — минимальная тепловая мощность, выделяемая пчелами в клубе и нагревателями; 4 — средняя температура поверхности нагревателя; 5 — средняя температура поверхности нижней части рамок, контролируемая пчелами).

Таблица 3. Средние значения температуры за двое суток в зимние месяцы 2016/2017 г.

Месяцы	Среднее значение температуры за очередные двое суток, °С															
	Декабрь	-1	0	-7	-6	-4	-1	0	-10	-16	-14	-6	-6	-7	-8	-7
Январь	-2	0	1	1	-1	2	-1	2	0	-3	-6	-4	-2	-12	-9	-15
Февраль	-14	-6	1	2	-3	-6	-7	-4	-11	0	2	1	8	-1	3	-

и поверхности, контролируемой пчелами. В качестве такой поверхности приняты плоскости нижних планок рамок, так как они имеют температуру, равную температуре воздуха, окружающего нижнюю часть клуба. В зависимости от этой температуры T_0 пчелы изменяют геометрию клуба и величину вырабатываемой тепловой энергии. Анализ полученных зависимостей показывает, что температура нагревателей не превышает +46°С, что допустимо, при этом температура, контролируемая пчелами, изменяется с +5°С до -1.5°С (начиная с температуры окружающего воздуха -20°С), такие внутренние колебания тем-

пературы уже можно принимать для практического использования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Используя полученную модель с оптимальными значениями мощности нагревателей, можно произвести расчеты по расходу энергии пчелами и электронагревателями в определенные периоды зимовки. Для этого, используя метеоданные зимы 2016/2017 года, были получены таблицы со значениями температуры по трем зимним месяцам (табл. 3). Температуру брали как среднее значение за двое суток. Это связано с тем, что теплоемкость ульев довольно высокая, и постоянная времени находится на уровне 16 ч.

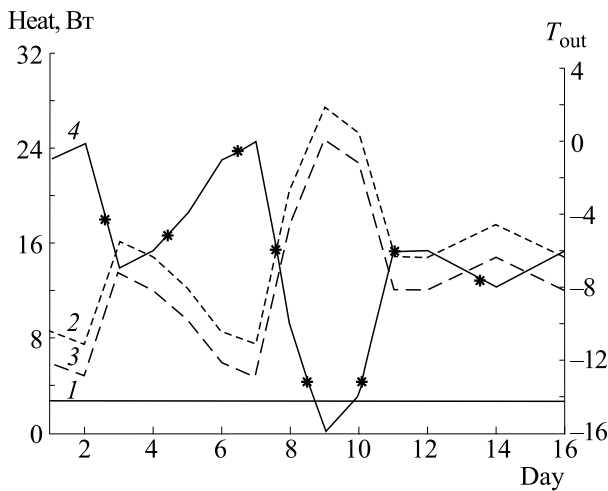


Рис. 5. Графики зависимости мощностей тепла (Heat), выделяемых пчелами и нагревателями, от дней декабря (Day) и наружная температура воздуха в этот период (T_{out} , правая ось): 1 — максимальная тепловая мощность, генерируемая пчелами в клубе; 2 — максимальная тепловая мощность, выделяемая пчелами в клубе и нагревателями; 3 — максимальная тепловая мощность, выделяемая нагревателями; 4 — T_{out} — наружная температура воздуха.

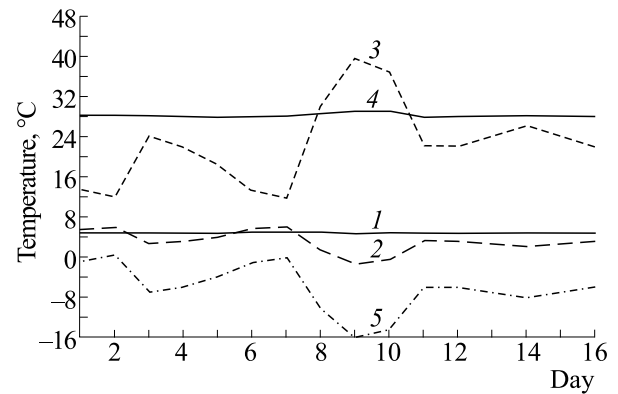


Рис. 6. Графики зависимости температуры в различных местах улья в течение первой половины декабря и наружной температуры в этот период: 1 — средняя температура поверхности нижней части рамок, контролируемая пчелами; 2 — средняя температура воздуха внутри улья; 3 — средняя температура поверхности нагревателя; 4 — максимальная температура в центральном сегменте клуба; 5 — T_{out} — наружная температура воздуха.

Подставив эти данные в модель как T_{out} , определяли соответствующие расходы электроэнергии для нагревателей и расходы энергии пчелами. Результаты моделирования в виде графиков зависимости соответствующих мощностей от календарных дней декабря месяца представлены на рис. 5 и 6.

Анализ рис. 6 показывает, что максимальная температура в центральном сегменте не превышает $+28^{\circ}\text{C}$, а температура воздуха внутри улья колеблется в незначительных пределах – от -2°C до $+5^{\circ}\text{C}$.

Также можно проводить определение массы съеденного меда из расчета, что для выделения пчелами тепловой мощности 1 Вт им нужен расход кормового меда 0.32 г/ч (г/Вт·ч). Тогда в декабре за счет электроподогрева пчелы сократят потребление корма на 388 г. Аналогичные данные получены также по другим зимним месяцам. Так, сокращение потребления меда за январь составит 242 г, а за февраль – 210 г. Всего за три зимних месяца экономия корма составит 840 г при дополнительном расходе электроэнергии 22.1 кВт·ч. Если учесть потребность в расходе корма и в осенние месяцы, то экономия меда достигнет 1 кг.

ВЫВОДЫ

Моделирование параметров микроклимата при включенных нагревателях в нижней части улья показало, что происходит смещение максимальных температур внутри клуба в нижнюю часть, но при этом внутренняя температура не превышает значение $+31^{\circ}\text{C}$. Включение нагревателей приводит к увеличению объема положительных температур, а значит, у пчел появляется возможность перехода на новые кормовые запасы. Установлено, что при удельной мощности нагревателей 74000 Вт/м^3 пчелы сокращают выделение энергии с 3600 Вт/м^3 до 1900 Вт/м^3 , что даст возможность пчеловодам оставлять меньше меда на зиму. Проведенная оптимизация мощностей нагревателей в среде Comsol по критерию минимума колебаний температуры внутри улья и ограничений температуры поверхностей нагревательных элементов показала, что при изменении температуры окружающей среды от 0°C до -30°C общая мощность нагревателей должна изменяться от 4.8 Вт до 34.5 Вт, при этом температура их поверхности не превышает 45°C , а температура вокруг клуба пчел изменяется от $+5^{\circ}\text{C}$ до -1.5°C . Подстановка оптимальных значений мощности нагревателей и метеоданных по зиме 2016/2017

года в полученную модель показала, что пчелы в течение всего периода выделяли мощность на уровне 2.7 Вт, а мощность нагревателей достигала в максимуме 24 Вт. На основе проведенных исследований была разработана система адаптивного электрообогрева пчел, на которую получен патент [15].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. E. Southwick and J. N. Mugaas, Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiology **40**, 935 (1971).
2. C. D. Owens, *The thermology of wintering honey bee colonies* (United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin no. 1429, 1971).
3. А. И. Касьянов, Пчеловодство, № 2, 16 (2003).
4. А. Д. Трифонов, Пчеловодство, № 11, 21 (1990).
5. А. Ф. Рыбочкин и И. С. Захаров, *Компьютерные системы в пчеловодстве* (Курский гос. техн. ун-т, Курск, 2004).
6. E. E. Southwick, Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiology **75**, 641 (1983).
7. W. G. Meikle and N. Holst, Apidologie **46** (1), 10 (2015).
8. T. I. Szabo, Am. Bee J. (USA) **129**, 554 (1990).
9. Е. К. Еськов, В. А. Тобоев, Зоол. Журнал **90** (3), 335 (2011).
10. Е. К. Еськов и В. А. Тобоев, Биофизика **54** (1), 114 (2009).
11. В. А. Тобоев и М. С. Толстов, Межотраслевой институт «Наука и образование». Ежемесячный науч. журн., № 3, 116 (2014).
12. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, Биофизика **64** (1), 153 (2019).
13. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, *Электротехнологические способы и оборудование для повышения производительности труда в медотоварном пчеловодстве Северного Кавказа* (ООО «Крон», Краснодар, 2015).
14. D. W. Severson and E. H. Erickson, Jr., Apidologie **21**, 135 (1990).
15. Н. И. Богатырев, С. В. Оськин, Л. В. Потапенко и Е. В. Пустовойтова. Патент РФ №2639324, БИ, № 36 (2017).

Modeling of Thermophysical Processes in Electrically Heated Hives

S.V. Oskin and D.A. Ovsyannikov

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina 13, Krasnodar, 350044 Russia

To help bee colonies survive the cold snaps and minimize honey consumption by a cluster of bees, the electric heat comes in useful to keep the bees warm. However, limited knowledge of behavioral patterns that create the bees when grouped in the winter cluster may sometimes cause the colony's demise or make the bees to consume larger volume of honey. This paper presents the results of modeling the physical processes within the hive environment using Comsol software version 5.3. The simulation was carried out at a fixed outdoor temperature with variable heater power as well as at fixed heater power and variable ambient temperature. Analysis of thermograms indicated that when the heating device operates, a transition from the warmest layer to the cold region in the winter cluster occurred, it can be explained by biological mechanisms. Also, it was shown that when the heating devices warm a hive, the warm air within a hive increases, consequently, offering a greater opportunity for bees to have new diets: this is especially important in spring. Simulation results demonstrate that at low temperatures bees reduce mechanical power output from 3600 W/m³ to 1900 W/m³ that is almost two times less. Such reduction in the mechanical power output of bees results in lesser amount of honey consumption. Simulation-based optimization of the input power to the heaters was also implemented following the criteria of minimum temperature fluctuations within the hive preventing the heaters from overheating.

Keywords: bee, hive, temperature, simulation, electric heating