

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА ПЧЕЛИНОГО УЛЬЯ В КОНЦЕ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА

© 2022 г. С.В. Оськин, Д.А. Овсянников, И.Н. Шишигин

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,  
E-mail:kgauet@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Для преодоления тяжелого периода зимовки пчел, который наблюдается в конце зимы и в начале весны, пчеловоды применяют электрический обогрев ульев. Приводимые ранее исследователями данные по моделированию такого состояния пчел не связаны с изменением геометрического места агрегации пчел и изменениями кормовых запасов в улье. Для правильной настройки системы управления электронагревателями было проведено моделирование основных физических процессов в пчелиной семье в программном продукте Comsol. Моделирование проводилось при сокращении запасов меда на две трети от начальных и перемещении агрегации пчел из центра улья к верхней его части. Анализ результатов показал, что зимняя агрегация пчел в конце пассивного периода требует дополнительной вентиляции внутреннего пространства улья и может приводить к переувлажнению своего скопления. Общая теплоемкость меда снизилась, что приводит к повышенным, но допустимым температурным колебаниям внутри агрегации пчел. Средняя температура меда в конце зимы становится выше, что является положительным эффектом, так как пчелы легче могут забирать кормовые запасы. В секционированных нагревателях в этот период следует провести перераспределение подводимой мощности, уменьшив количество тепла, выделяемого крайними тепловыми элементами.

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

DOI: 10.31857/S0006302922010100

В зимний период для осуществления терморегуляции пчелы используют медовые запасы улья [1–6]. В связи с этим главными задачами пчеловодов осенью являются следующие: рассчитать необходимую массу корма на всю зиму, оценить его качество (мед не должен находиться в закристаллизованном состоянии), правильно расположить медовые рамки, предположить, где сформируется клуб и куда он будет смещаться за период зимовки. Считается, что самым тяжелым периодом для пчел является конец зимы и начало весны. За предыдущие месяцы пчелы потребили мед из центральных рамок, агрегация поднимается к верхней части улья и старается доставать мед из дальних медовых рамок. Также возможно смещение клуба пчел в какую-то одну сторону улья, что может привести к невозможности достать мед с другой стороны и к гибели пчел от голода. Чтобы этого не произошло, многие пчеловоды применяют электрообогрев. Подача в улей дополнительного тепла помогает пчелам успешнее проводить миграцию по всему объему своего обитания. Особенно эффективно применение обогрева при резких суточных колебаниях, так как это дополни-

тельное тепло позволяет сузить диапазон колебаний температуры внутри улья [7]. Эффективна установка внутри улья трех нагревателей с раздельным регулированием мощности [8]. Однако в любом случае применение электрообогрева должно сопровождаться адекватным управлением. Это связано с тем, что пчелы также хотят подстроиться под изменения температуры, что может привести к дополнительному перерасходу корма и раннему переводу их в активное состояние. Адекватное регулирование тепловым режимом улья возможно на основе проведения моделирования с использованием специальных программных продуктов.

Моделированию тепловых процессов посвящали свои работы многие исследователи [9–14]. В Кубанском ГАУ также проводят моделирование поведения пчел в среде Comsol [7, 8, 15]. В результате таких исследований были обнаружены критические зоны в ульях, определены теплофизические характеристики зимнего клуба пчел и их зависимости от параметров окружающей среды, проанализирован воздухообмен улья. Была доказана необходимость применения локального

электрообогрева с дифференцированным регулированием подводимой мощности. Однако все исследования проводились с постоянной массой корма в улье и неизменным расположением агрегации пчел в улье.

В реальности зимнее скопление пчел не находится в стационарном состоянии, а перемещается внутри улья в течении периода зимовки. Во время весенних потеплений клуб может вообще распаться и при похолодании собраться в другом месте улья. Теплоемкость и теплопроводность содержимого улья в начале и в конце зимнего периода разные, а это влияет на биологические процессы агрегации пчел. К основным жизненно важным биологическим процессам зимнего клуба пчел следует отнести: выделение тепла за счет увеличения подвижности мышечной части и учащения дыхания отдельных особей, выделение влаги в результате дыхания пчел и поедания ими меда, перемещения каждой особи изнутри клуба на его периферию и обратно, изменение размеров клуба в зависимости от температуры окружающего воздуха, изменение температуры внутри клуба при появлении первых личинок. В связи с этим биологические и физические явления в объекте исследований взаимосвязаны. Существует проблема создания адекватных моделей основных биофизических процессов, протекающих во внутреннем пространстве улья с находящейся в нем агрегацией пчел. Возникает цель исследования – провести моделирование микроклимата в пчелином улье с электрообогревателями при уменьшении массы корма и изменении места расположения пчелиного клуба, что соответствует состоянию пчел в конце зимы и началу весны.

### МОДЕЛЬ

В предыдущих работах [7, 8, 15] были приведены результаты мультифизического моделирования на примере семьи из 15000 пчел, расположенных в двенадцатирамочном улье дадановского типа. Моделирование проводили с использованием среды моделирования Comsol с применением интерфейсов «Heat Transfer», «Transport of Diluted Species» и «Laminar Flow». Сейчас предлагается дополнить ранее полученные модели геометриче-

ским параметром, учитывающим место клуба в улье. Для этого вводится еще один показатель по массе меда – коэффициент заполнения отдельной рамки (медом):

$$k_{zn} = 1 - h_n/260, \quad (1)$$

где  $k_{zn}$  – коэффициент заполнения  $n$ -й рамки медом;  $h_n$  – высота части рамки с пустыми сотами  $n$ -й рамки.

По данной формуле можно рассчитать коэффициенты заполнения всех рамок в улье с учетом, что рамки имеют высоту 260 мм.

Также был проведен расчет центра расположения клуба с учетом того, что ранее в моделях ось агрегации пчел находилась на высоте 130 мм, а центральные рамки были без меда на высоту 152 мм. Так как первоначально высота части рамки с пустыми сотами равнялась 152 мм, то при уменьшении меда в процессе зимовки центры отдельных сегментов клуба будут подниматься на расстояние

$$\Delta h_{0i} = h_0 + (h_1 - 152), \quad (2)$$

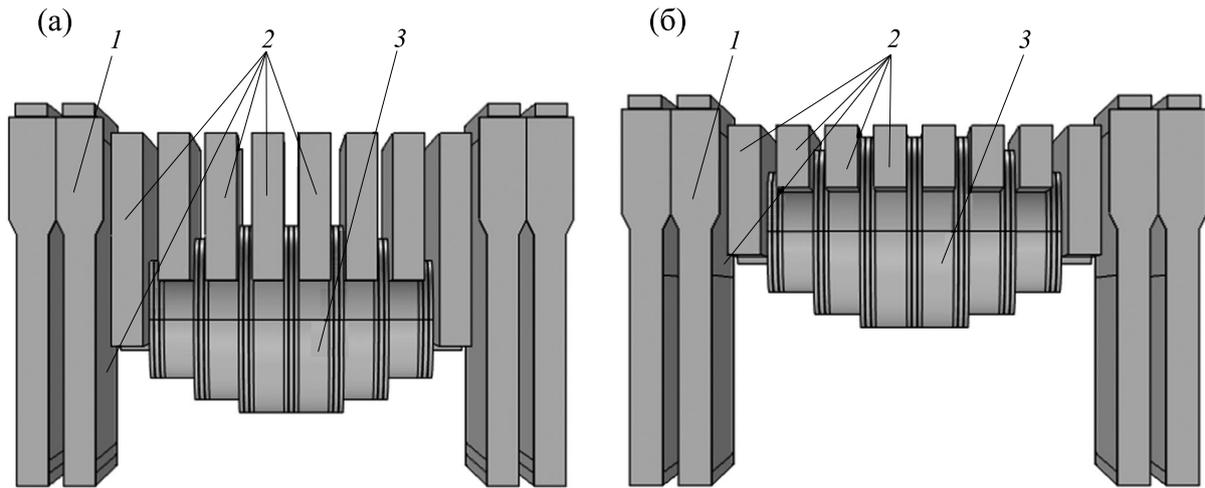
где  $h_0$  – высота центра клуба в начале зимнего периода (130 мм),  $h_1$  – высота первой рамки (центр клуба) с пустыми сотами.

В модели на начало зимнего периода высоты пустых сотов и коэффициенты заполнения медом были следующими:  $h_1 = 152$  мм,  $k_{z1} = 0.415$ ,  $h_2 = 100$  мм,  $k_{z2} = 0.615$ ,  $h_3 = 10$  мм,  $k_{z3} = 0.961$ . В конце зимнего периода эти параметры изменились и стали следующими:  $h_1 = 220$  мм,  $k_{z1} = 0.153$ ,  $h_2 = 168$  мм,  $k_{z2} = 0.353$ ,  $h_3 = 152$  мм,  $k_{z3} = 0.415$ .

Данные параметры можно менять и проводить расчеты на любой период зимовки. На рис. 1 представлены расположения агрегации в начале и в конце зимовки.

Для исследования состояния микроклимата агрегации пчел с изменением массы меда и геометрии клуба все модели по отдельным физическим процессам были дополнены геометрическими характеристиками. Так тепловая модель стала иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{air1} \cdot c_{air1} \cdot u_{air1} \cdot \nabla T + \rho_{air2} \cdot c_{air2} \cdot u_{air2} \cdot \nabla T + \rho_{elh} \cdot c_{elh} \cdot u_{air1} \cdot \nabla T + \\ + \nabla q_{air1} + \nabla q_{air2} + \nabla q_{wood} + \nabla q_{hc} + \nabla q_{emptyhc} + \nabla q_{bee} Nu + \nabla q_{elh} = Q_{bee} + Q_{elh}, \\ \lambda_{bee} = 0,0076 - 0,0017 \cdot T_0; \rho_{nc} = 243 - 8T_0, \\ Q_{bee} = 3.2T_0^2 - 20T_0 + 922, \\ q_i = -\lambda_i \Delta T, \\ Q_{elh} = f(T_0); k_{zn} = 1 - \frac{h_n}{260}; \Delta h_{0i} = h_0 + (h_1 - 152), \end{array} \right. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Внешний вид геометрических моделей с расположением пчелиного клуба в центре улья в начале зимы (а) и верхним расположением клуба в конце зимы (б); 1 – крайние рамки, 2 – соты с медом, 3 – отдельные сегменты пчелиного клуба.

где  $\rho_{air1}$  и  $\rho_{air2}$  – плотности воздуха поступающего соответственно снаружи и проходящего через клуб;  $c_{air1}$  и  $c_{air2}$  – теплоемкости соответственно внутреннего воздуха и воздуха внутри клуба;  $u_{air1}$  и  $u_{air2}$  – поля скоростей соответственно первого и второго воздушных объемов, м/с;  $q_{air1}$ ,  $q_{air2}$ ,  $q_{wood}$ ,  $q_{hc}$ ,  $q_{empty\ hc}$  и  $q_{bee}$  – плотности теряемых тепловых потоков путем теплопроводности соответственно воздушных объемов 1 и 2, деревянных элементов, медовых сот, пустых сот и пчелиного клуба, Вт/м<sup>2</sup>;  $Nu$  – число Нуссельта;  $\rho_{elh}$  и  $c_{elh}$  – соответственно плотность и теплоемкость электронагревателя;  $q_{elh}$  – плотность теряемого электронагревателем теплового потока путем теплопроводности;  $\lambda_{bee}$  – коэффициент удельной теплопроводности пчел;  $T_0$  – температура наружного воздуха;  $q_i$  и  $\lambda_i$  – плотности тепловых потоков  $i$ -х элементов и их теплопроводности;  $Q_{bee}$  и  $Q_{elh}$  – интенсивность тепловыделений соответственно пчел и электронагревателя.

Плотности теряемых тепловых потоков путем теплопроводности зависят от теплофизических характеристик материалов улья и находящихся в нем объектов. Эти характеристики были взяты из библиотеки Comsol. Аналогично принимали значения плотности и теплоемкости воздуха.

Наиболее сложно было получить аналитическое выражение  $Q_{elh} = f(T_0)$ . Сложности связаны со следующими ограничениями: регулирование центрального и боковых нагревателей нужно вести отдельно и по отдельному алгоритму, температура поверхности нагревателя не должна превышать 47°C (чтобы не травмировать пчел), регулирование производить необходимо дискретно. В связи с этим необходимую зависимость получили итерационным методом (см. таблицу) [15].

Остальные переменные определяли из других физических моделей. Для определения скоростей воздуха в различных точках улья проводилось отдельно моделирование интерфейсе «Laminar Flow» [15]. Движения воздушных масс оценивали по модели с соответствующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho_{air1} u_{air1}) + \nabla \cdot (\rho_{air2} u_{air2}) = 0, \\ 0 = \nabla \cdot \left( \left( \nabla u_{air1} + (\nabla u_{air1})^T - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_{air1}) I \right) \right) + \\ + \nabla \cdot \left( \left( \nabla u_{air2} + (\nabla u_{air2})^T - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_{air2}) I \right) \right), \\ u_{in} = \frac{0.0034 \cdot T^2 - 0.0216 \cdot T + 1}{\left[ (0.007 \cdot T + 11.5) - (0.0065 \cdot T^2 + 0.3 \cdot T + 4.03) \right] \cdot 1.44 \cdot 10^{-3}}, \\ -p_1 = -pI + \left( \nabla u_{airin2} + (\nabla u_{airin2})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_{airin2}) I, \\ p_2 = -pI + \left( \nabla u_{airout2} + (\nabla u_{airout2})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_{airout2}) I, \end{cases} \quad (4)$$

Значения оптимальных мощностей нагревателей при разных температурах окружающего воздуха

Наименование показателей	Значения показателей						
	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
Температура, °С							
Мощность центрального нагревателя, Вт	1.5	3.5	6.0	8.0	9.5	10.5	11.5
Суммарная мощность боковых нагревателей, Вт	3	7	12	16	19	21	23

где  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $I$  – единичный вектор;  $u_{in}$  – скорость воздуха на входе в улей, м/с;  $p_1$  и  $p_2$  – давление соответственно во входных и выходных плоскостях воздушного блока, Н/м<sup>2</sup>;  $u_{airin2}$  и  $u_{airout2}$  – скорости потоков воздуха соответственно на входе и выходе из пчелиного клуба, м/с.

Коэффициенты динамической вязкости брали из библиотеки материалов, а давление воздуха на

входе и выходе из клуба определяли итерационным путем по данной модели.

Моделирование изменения влажностного режима проводили с учетом процессов конвекции, диффузии и адсорбции на основании законов Фика, Навье–Стокса и Дарси [15]. Общая модель изменения влажности в улье с учетом процессов диффузии и конвекции будет иметь следующий вид [15]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_{water}}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{water} \nabla c_{water}) + u \cdot \nabla c_{water} = 0, \\ j_1 = -D_{water} \nabla c_{water} + u \cdot c_{water} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_b \cdot c_{Pwater}) = \nabla \cdot (D_e \nabla c_{water}); \rho_b = (1 - \varepsilon_p) \rho, \\ j_2 = -D_e \nabla c_{water}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $c_{water}$  и  $D_{water}$  – соответственно концентрация и коэффициент диффузии воды;  $j_1$  и  $j_2$  – диффузионные потоки соответственно в газовой и твердой фазах;  $c_{Pwater}$  – концентрация влаги в твердой фазе;  $\rho_b$  – эквивалентная плотность твердого вещества,  $\rho_b = (1 - \varepsilon_p) \rho$ , где  $\varepsilon_p$  – пористость материала;  $D_e$  – эффективная составляющая коэффициента диффузии.

Все математические модели связывались между собой через блок «Multiphysics», что позволило получать совместные решения при изменении различных параметров. Эти модели описывают основные физические процессы в улье: тепловые, влажностные, движение воздуха.

На основании принятых коэффициентов заполнения медом отдельных рамок, что соответствует в среднем уменьшению меда в улье на две трети от начального состояния, было проведено решение полученных моделей. Оценку полученных численных значений проводили по результатам тепловизионной съемки объекта исследований и сопоставляли с реальными данными, полученными авторами и опубликованными в литературе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первоначально исследовали температурные поля в отдельных местах улья при разных наружных температурах. Анализировали изменение расположения клуба и его влияние на тепловые поля всего улья.

На рис. 2 представлены изображения тепловых полей внутри улья в разрезе через центральную улочку при температуре наружного воздуха  $-14^\circ\text{C}$ . По этим изображениям видно, что особое изменение температурных полей самого клуба не наблюдается. Видно, что нижняя часть клуба становится менее нагретой. В то же время наблюдается увеличение температуры потолочной части улья. Это положительный результат, так как в этот период зимовки пчеловоды кладут подкормку на потолочную часть улья (под крышку), и она должна быть теплой для лучшего поедания пчелами.

На рис. 3 представлены изображения поверхностей тепловых полей в улье в поперечном разрезе при температуре наружного воздуха  $-14^\circ\text{C}$ . Наблюдается более равномерное распределение температуры по объему улья, что является положительным моментом.

Наблюдаются изменения влажностного состава в улье при той же температуре. На рис. 4 приве-

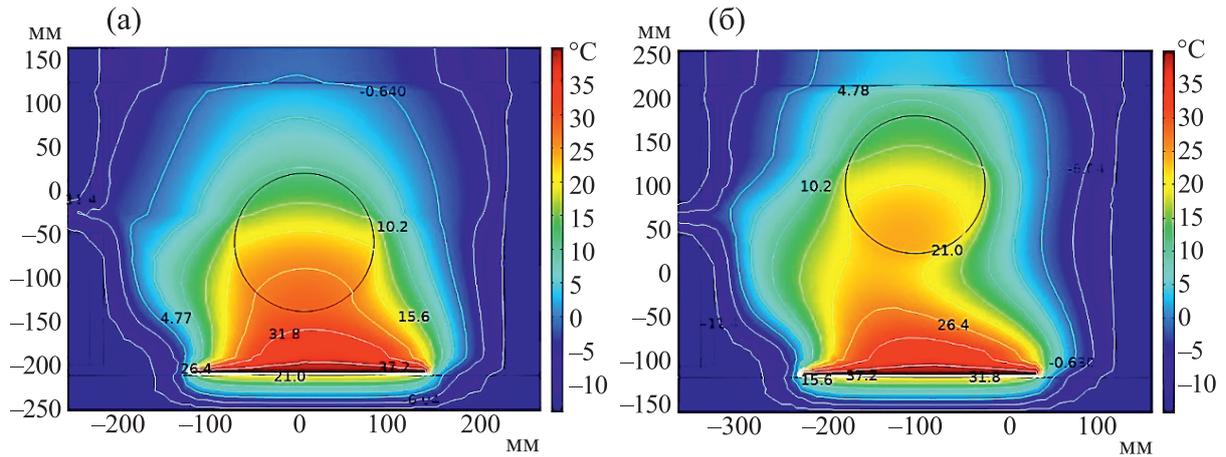


Рис. 2. Изображения тепловых полей внутри улья при температуре наружного воздуха  $-14^{\circ}\text{C}$  с расположением пчелиного клуба в центре улья (а) и в верхней его части (б).

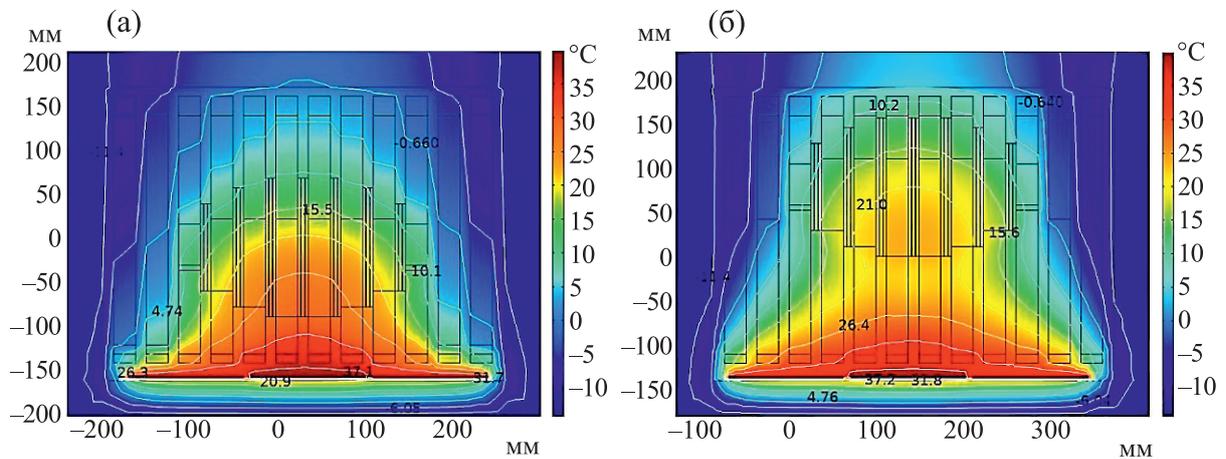


Рис. 3. Изображения тепловых полей внутри улья в поперечном разрезе при температуре наружного воздуха  $-14^{\circ}\text{C}$  с расположением пчелиного клуба в центре улья (а) и в верхней его части (б).

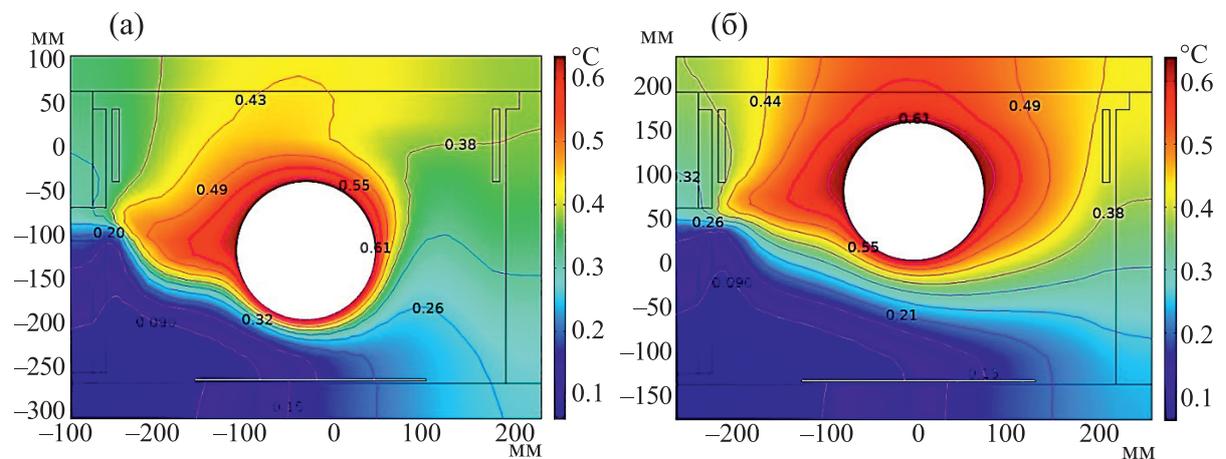
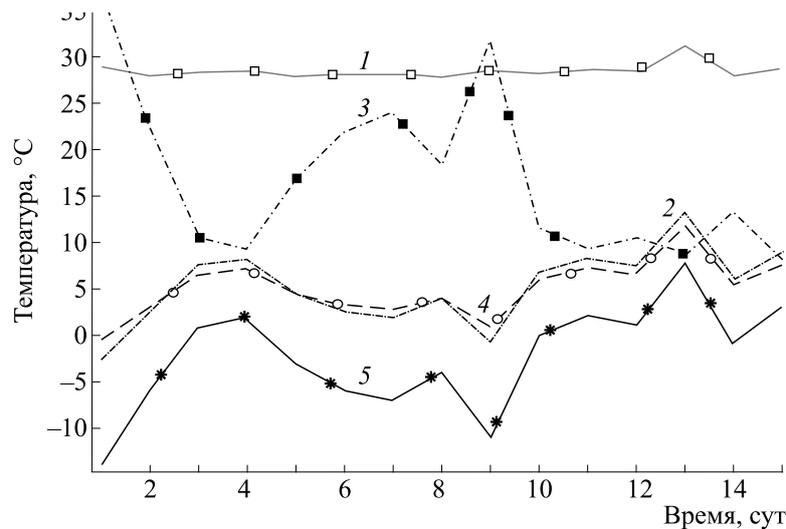


Рис. 4. Изображения влажностного состава воздуха внутри улья при температуре наружного воздуха  $-14^{\circ}\text{C}$  с расположением пчелиного клуба в центре улья (а) и в верхней его части (б).



**Рис. 5.** Графики температур при большом количестве меда и расположении пчелиного клуба в центре улья: 1 – температура центрального сегмента пчелиного клуба, 2 – температура меда, 3 – температура нагревателей, 4 – температура внутри улья, 5 – температура снаружи.

дены сечения улья по центральной улочке с указанием значений концентрации влаги во внутреннем воздухе. На рис. 4б видно, что над клубом собирается воздух с содержанием влаги до 0.45–0.50 моль/м<sup>3</sup>. Такая концентрация влаги опасна для пчел и необходимо интенсифицировать вентиляцию. Обычно пчеловоды при недостатке вентиляции раздвигают несколько планок в потолке улья. Это следует сделать, как видно из рисунков, в конце зимы. Если вентиляция будет недостаточна, то на потолочной части улья будут конденсироваться капли влаги. Часть этой влаги будет попадать обратно внутрь клуба пчел, а это может привести к гибели пчелиной семьи.

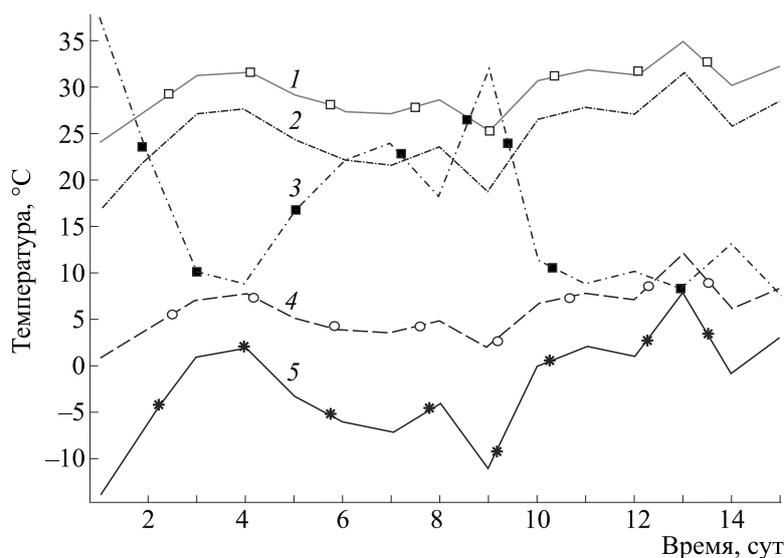
### ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения мультифизического моделирования стационарных режимов в улье анализировали состояния микроклимата улья за календарные дни февраля месяца в конкретном регионе Краснодарского края. Были построены графики по изменению температуры в отдельных местах улья в зависимости от дня в месяце и от массы меда с разным расположением агрегации пчел. На рис. 5 и 6 представлены соответствующие графики. Анализировали два состояния пчелиной семьи: полные кормовые запасы и клуб находится в центре, что соответствует началу зимы; запасы меда уменьшились на две трети от начальных и агрегация пчел находится вверху улья, что соответствует концу зимы. По графикам видно следующее. Явные изменения коснулись только зависимостей температур меда и внутренней тем-

пературы клуба от температуры окружающего воздуха. Заметны колебания температуры внутри агрегации и отмечается общее повышение температуры меда.

### ВЫВОДЫ

Наиболее эффективно применение электрообогрева пчел в конце зимы и в начале весны. Это связано с возникновением больших суточных колебаний температуры окружающего воздуха. Известно, что в этот период клуб пчел поднимается к верху улья, а общие запасы меда значительно уменьшаются. При этом пчелы вынуждены мигрировать по всему улью в поисках оставшихся кормовых запасов. Чтобы правильно настроить систему управления нагревателями в улье, необходимо провести моделирование основных физических процессов, протекающих в пчелиной семье. Проведенное мультифизическое моделирование в программе Comsol позволило выявить влияние отдельных физических характеристик улья на биологические процессы агрегации пчел. При перемещении агрегации пчел в верхнюю часть наблюдается повышение температуры потолка улья, что дает возможность подогреть весеннюю подкормку. Наблюдается значительное повышение влажности верхней части улья, что связано с ухудшением вентиляции пчелиного клуба. Необходимо создать условия для улучшения вентиляции агрегации пчел, находящейся в верхней части улья, что можно сделать путем от-



**Рис. 6.** Графики температур при меньшем количестве меда и расположении пчелиного клуба сверху улья: 1 – температура центрального сегмента пчелиного клуба, 2 – температура меда, 3 – температура нагревателей, 4 – температура внутри улья, 5 – температура снаружи.

крытия отверстий в потолочной части или раздвинув верхние планки. Подстановка значений метеоданных за февраль в Краснодарском крае в полученные модели показала, что при выделении пчелами в течение всего периода той же мощности температура внутри агрегации пчел начинает осуществлять большие колебания, но не выходит за допустимые пределы. Эти колебания температуры можно объяснить уменьшением общей теплоемкости всего улья за счет уменьшения массы меда. В то же время общая температура меда возросла, следовательно, пчелы смогут легче взять его из ячеек сот. При секционной установке нагревателей в конце зимы можно уменьшить подводимую мощность к крайним элементам нагрева.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания 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* (USA Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bul. 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. D. W. Severson and E. H. Erickson, Jr., *Apidologie* **21**, 135 (1990).

7. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, *Биофизика* **65** (5), 978 (2020).

8. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, *Биофизика* **65** (2), 381 (2020).

9. E. E. Southwick, *Comp. Biochem. Physiol. Part A: Physiology* **75**, 641 (1983).

10. W. G. Meikle and N. Holst, *Apidologie* **46** (1), 10 (2015).

11. T. I. Szabo, *Am. Bee J. (USA)* **129**, 554 (1990).

12. Е. К. Еськов и В. А. Тобоев, *Зоол. Журнал* **90** (3), 335 (2011).

13. Е. К. Еськов и В. А. Тобоев, *Биофизика* **54** (1), 114 (2009).

14. В. А. Тобоев и М. С. Толстов, *Наука и образование* **3**, 116 (2014).

15. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, *Биофизика* **64** (1), 153 (2019).

## **Modelling Beehive Microclimate in the End of Wintering**

**S.V. Oskin, D.A. Ovsyannikov, and I.N. Shishigin**

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

Beekeepers use electric heaters installed in the hive to help bees to survive the difficult winter time from late winter to early spring. The data researchers previously collected under other studies to simulate this condition of bees are not related to changes in the geometrical location of bee aggregations and changes in food reserve in the hive. In order to correctly set up the electric heater control system, the main physical processes in the bee family were simulated using Comsol software. The simulation was performed reducing honey availability by 2/3 of the initial honey reserve and moving the aggregation of bees from the center of the hive to the top of the hive. Analysis of the results showed that in the end of wintering when bees are in a passive state the hive should be additionally vented to protect bee aggregations from the overwhelming humidity and condensation they might bring. The total heat capacity of honey decreased, resulting in increased but acceptable temperature fluctuations within the bee aggregation. The average temperature of honey in the end of wintering becomes higher; it is a positive effect because bees will be able to pick up their forage supplies more easily. In sectioned heaters, the power input should be redistributed during this period by reducing the amount of heat generated by the outermost heat elements.

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