

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЧЕЛИНОМ УЛЬЕ

© 2019 г. С.В. Оськин, Д.А. Овсянников

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

E-mail: kgaueit@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.12.17 г.

После доработки 09.11.18 г.

Принято к публикации 19.11.18 г.

Для анализа физических течений, происходящих в улье, принято зимнее скопление, состоящее из 15000 пчел, расположенных в деревянном корпусе с двенадцатью рамками. Особенностью исследования является учет изменения объема клуба во время зимовки и взаимная увязка тепловых, воздухообменных и влажностных процессов. Моделирование физических процедур в улье проводили в программной среде Comsol 5.3. Изображения температурных полей подтверждают высокую теплоизолирующую способность пчел. На поверхности пчелиного клуба температура находится на уровне $+12^{\circ}\text{C}$. Несмотря на изменения температуры за пределами клуба, внутри него поддерживается стабильная температура от $+25$ до $+32^{\circ}\text{C}$. В клубе температура неравномерна, есть очаги повышенных значений, но не более $+34^{\circ}\text{C}$, что не опасно для пчел. Анализ воздухообменных процессов показывает, что скорость движения воздуха на входе в улей $0,03\text{--}0,1$ м/с, а в центральном летке – $0,12\text{--}0,17$ м/с. Наиболее высокие скорости движения – выше $0,19$ м/с – наблюдаются внутри клуба. Влажностный состав улья следующий: поступающий воздух имеет концентрацию влаги около $0,04$ моль/м³, а выходящий – $0,5\text{--}0,6$ моль/м³. Это происходит за счет вывода влажного воздуха из клуба. Изображения распределения концентрации влаги в элементах улья доказывают соответствие степени насыщения деревянных элементов влажности пограничного воздуха.

Ключевые слова: пчела, улей, температура, влажность, воздухообмен, моделирование.

DOI: 10.1134/S0006302919010186

В пчеловодстве очень важным и ответственным моментом является зимовка. От успешности прохождения этого периода существования пчелиной семьи зависит ее продуктивность в течение года, особенно на весенних медосборах. Если после зимовки пчелиная семья сильно ослабла, то она не успевает заменить зимующих пчел и нарастить нужное количество рабочих пчел к периоду цветения медоносных растений. Публикуется множество исследований, посвященных этому сложному периоду состояния пчел. Тщательный анализ с использованием современных программных продуктов был проведен в работах [1–4]. Особенностью зимнего состояния пчел является их способность к агрегации и поддержанию внутренней температуры на уровне $24\text{--}32^{\circ}\text{C}$ при широких колебаниях наружной температуры. В конце зимы при появлении расплода пчелы поднимают температуру до 34°C . Поддержание таких температур происходит за счет потребления пчелами меда и постоянной вентиляции зимнего клуба. Несмотря на большое количество публикаций

в этой области, сам процесс требует дальнейших исследований. Потребность полного понимания жизнедеятельности пчел диктуется задачами повышения медопродуктивности отечественного пчеловодства. До сих пор нет твердых рекомендаций по количеству оставляемого меда пчелам на зиму и каковы должны быть параметры вентиляции. Особенно это важно в случае, если пчеловоды используют в зимнее время электрообогрев. Необходимо правильно подобрать режим работы обогревателей. Последнее важно из-за того, что при избыточном обогреве повышается потребление меда и можно спровоцировать пчелиную матку на яйцекладку в холодные дни, что в перспективе приведет к гибели пчелиной семьи. Кроме того, дополнительное потребление корма приводит к преждевременному забиванию кишечника пчел и их гибели. Таким образом, нужно продолжать подобные исследования с целью создать оптимальные условия пчелиным семьям в зимний период и не допускать больших колебаний температуры во внутриульевом пространстве. Есть

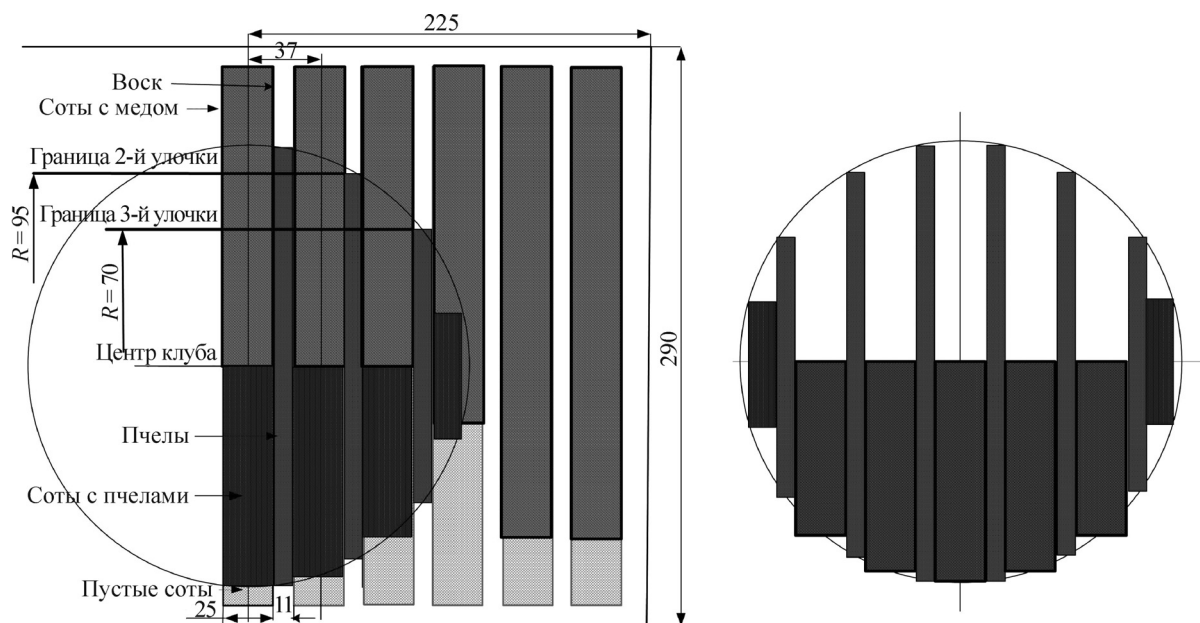


Рис. 1. Геометрические параметры основных элементов улья и пчелиного клуба.

существенные различия в зимовке пчелиных семей в зависимости от региона нашей страны. Так, например, отличительными особенностями прохождения такого периода на Северном Кавказе являются: поздняя агрегация пчел в клуб, большие колебания температуры окружающего воздуха в осенний и зимний период, раннее появление расплода.

МОДЕЛЬ

Для анализа физических процессов, протекающих в улье, мы приняли в качестве базовой семьи скопление 15000 пчел, расположенных в двенадцатирамочном улье дадановского типа. Известно, что зимой пчелы собираются в тело, максимально похожее на шар. Мы представили зимний клуб отдельными цилиндрами разного размера, которые в комплексе напоминают шар. Отдельные цилиндры – это пчелы, размещающиеся в ячейках сот, и пчелы, расположенные в межсотовом пространстве (рис. 1). Считаем, что клуб размещается в центре улья, и скопление пчел имеет диаметр 220 мм – это соответствует занятию ими шести улочек. Основные геометрические параметры и пространственные размещения основных элементов представлены на рис. 1.

Во время зимовки пчелы постоянно вентилируют клуб, что связано с необходимостью удаления влаги, образованной в результате поедания меда. Так как при повышении температуры за клубом его плотность уменьшается, то увеличивается расстояние между соседними

пчелами. Для того чтобы смоделировать процесс прохождения воздуха через клуб, разделим улочки на воздушные цилиндры с изменяющейся высотой цилиндра. Эти цилиндры по своему объему будут эквивалентны общему объему воздуха в улочке, занимаемой пчелами. Принимаем по два воздушных цилиндра в улочке, их высота изменяется по линейному закону в функции от температуры.

Допускаем, что зависимость плотности агрегации пчел ρ_{bee} от наружной температуры является линейной, тогда соответствующее уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\rho_{bee} = 243 - 8T_0,$$

где T_0 – температура окружающего воздуха.

Коэффициент удельной теплопроводности агрегации пчел λ_{bee} зависит от их плотности. Так, с увеличением этого параметра растет и теплопроводность, в среднем от $7,6 \cdot 10^{-2}$ до $0,126$ Вт/(м·К) [5–7]. Тогда коэффициент теплопроводности агрегации пчел также будет изменяться линейно в соответствии со следующим уравнением:

$$\lambda_{bee} = 0,076 - 0,0017T_0.$$

В качестве допущения можно принять, что теплопередача у пчел, находящихся в сотах, будет происходить за счет теплопроводности, а у пчел, расположенных в улочках, – еще и за счет внутренней конвекции.

Особенностью данного анализа является учет изменения объема клуба во время зимовки. Так как зимой плотность клуба изменяется, то будет изменяться и радиус клуба в зависимости от температуры окружающего воздуха, что было описано соответствующими уравнениями.

Известно, что зависимость мощности тепловыделения пчел от наружной температуры имеет параболический вид [5,7,8]. Для случая из 15000 пчел уравнение аппроксимации имеет следующий вид:

$$P_{\text{bee}} = 0,016T_0^2 - 0,1T_0 + 4,61.$$

Так как для дальнейшего анализа потребуются именно удельная мощность, воспроизводимая пчелами, то разделим полученное выражение на занимаемый клубом объем и получим уравнение для интенсивности тепловыделения пчел [7]:

$$Q_{\text{bee}} = \frac{P_{\text{bee}}}{V_{\text{bee}}} = \frac{0,016T_0^2 - 0,1T_0 + 4,61}{0,005} = 3,2T_0^2 - 20T_0 + 922,$$

где V_{bee} – объем, занимаемый пчелиным клубом и составляющий $0,005 \text{ м}^3$.

Если принять утверждение, что при скорости потребления меда $0,32 \text{ г/ч}$ выделяется мощность 1 Вт [7,8], уравнение для определения расхода корма (г/ч) в зимний период будет иметь вид:

$$G_{\text{bee}} = 0,005T_0^2 - 0,032T_0 + 1,475.$$

В литературе [5,9] приведено уравнение для определения необходимого расхода воздуха пчелами для удаления образующейся в улье влаги:

$$Q_{\text{air}} = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{A_{\text{out}} - A_{\text{in}}},$$

где $q_{\text{H}_2\text{O}}$ – количество воды, выделившееся в результате окисления корма, г/ч ; A_{out} и A_{in} – абсолютное влагосодержание соответственно выходного и входного воздуха, г/м^3 .

Количество воды, выделившееся в результате окисления корма, можно определить по следующей формуле [7,8]:

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,68G_{\text{bee}}.$$

На основании таблиц перевода относительной влажности в абсолютную получено следующее аппроксимирующее уравнение для определения необходимого расхода воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$):

$$Q_{\text{air}} = \frac{0,0034T_0^2 - 0,0216T_0 + 1}{A_{\text{out}100} - A_{\text{in}80}} = \frac{0,0034T_0^2 - 0,0216T_0 + 1}{(0,007T_0 + 11,5) - (0,0065T_0^2 + 0,3T_0 + 4,03)}.$$

Моделирование физических процессов, происходящих в улье, было проведено в программной среде для мультифизического моделирования Comsol 5.3. Полученные уравнения для определения геометрических и физических параметров были введены в соответствующие блоки программы. Исследования проводили на основе мультифизической связи интерфейсов «Heat Transfer» и «Laminar Flow», что позволило одновременно вычислять тепловые процессы и скорости перемещения воздушных масс. Использовали аналитический блок «Transport of Diluted Species» по анализу процессов перемещения влаги и адсорбции.

Весь анализ проводили первоначально для стационарных режимов. Обобщенную математическую модель, описывающую тепловые процессы в улье, можно представить в виде:

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

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 $c_{\text{air}2}$ – теплоемкости воздуха соответственно первого и второго воздушных блоков (внутреннего воздуха и воздуха внутри клуба); $u_{\text{air}1}$ и $u_{\text{air}2}$ – поля скоростей соответственно первого и второго воздушных блоков, м/с ; $q_{\text{air}1}$, $q_{\text{air}2}$, q_{wood} , q_{hc} , q_{emptyhc} , q_{bee} – плотности теряемых тепловых потоков путем теплопроводности соответственно воздушных блоков 1 и 2, деревянных элементов, медовых сот, пустых сот, пчелиного клуба, Вт/м^2 ; Nu – число Нуссельта.

Значения плотности, теплоемкости и теплопроводности отдельных воздушных блоков брали из библиотеки материалов программы с соответствующими температурными коррекциями. Температура и поле скоростей являются переменными величинами, так же как и плотности теряемых тепловых потоков. Плотности теряемых потоков пропорциональны коэффициенту теплопроводности и температуре. Коэффициенты теплопроводности отдельных эле-

ментов модели, с размерностью Вт/(м·К), имели следующие значения: деревянные элементы – 0,8; соты без меда – 0,04; соты с медом – 0,33.

Необходимо отметить, что пчелы в зимнем клубе передают тепло не только за счет теплопроводности, но и за счет конвекции. Поэтому при разработке модели нужно вводить поправку на теплопроводность пчел через критерий Нуссельта. Согласно литературным данным, коэффициент теплоотдачи пчел может изменяться от 6 до 30 Вт/(м²·К), теплопроводность

пчел изменяется в диапазоне 0,1...0,06 Вт/(м·К). Конечно, этот критерий будет зависеть от воздухообмена зимнего клуба. Расчеты показали, что критерий Нуссельта при температуре –30°C равен 7,67, а при 0°C – 1,86.

Данная модель описывает тепловые процессы, происходящие во внутриульевом пространстве и внутри пчелиного клуба.

В стационарном ламинарном режиме математическая модель движения воздушных масс может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \nabla(\rho_{\text{air}1}u_{\text{air}1}) + \nabla(\rho_{\text{air}1}u_{\text{air}1}) = 0, \\ 0 = \nabla\left(\mu\left(\nabla u_{\text{air}1} + (\nabla u_{\text{air}1})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{\text{air}1})I\right)\right) + \nabla\left(\mu\left(\nabla u_{\text{air}2} + (\nabla u_{\text{air}2})^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{\text{air}2})I\right)\right), \\ u_{\text{in}} = \frac{0,034T^2 - 0,0216T + 1}{[(0,007T + 11,5) - (0,0065T^2 + 0,3T + 4,03)]1,44 \cdot 10^{-3}}, \\ -p_1 = -pI + \mu(\nabla u_{\text{air in}2} + (\nabla u_{\text{air in}2})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{\text{air in}2})I, \\ p_2 = -pI + \mu(\nabla u_{\text{air out}2} + (\nabla u_{\text{air out}2})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u_{\text{air out}2})I, \end{cases} \quad (2)$$

где p – давление, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; I – единичный вектор; u_{in} – скорость воздуха на входе в улей, м/с; p_1 и p_2 – соответственно давление во входных и выходных плоскостях воздушного блока, Н/м²; $u_{\text{air in}1}$ и $u_{\text{air in}2}$ – скорости воздуха соответственно на входе и выходе из клуба, м/с.

Переменными параметрами являются скорости воздуха. Давление p принимали равным атмосферному давлению. Коэффициент динамической вязкости брали из библиотеки материалов. В результате нескольких прогонов модели получено регрессионное уравнение зависимости опорного давления, создаваемого пчелами на входе в клуб, от температуры входного воздуха:

$$p_{\text{оп}} = 2 \cdot 10^{-8}T_0^6 + 1 \cdot 10^{-6}T_0^5 + 6 \cdot 10^{-6}T_0^4 + 0,001T_0^2 + 0,019T_0 + 0,159.$$

Давления на входных (p_1) и выходных (p_2) плоскостях воздушного блока были определены в результате нескольких итераций и составили: $p_1 = 0,6p_{\text{оп}}$; $p_2 = -0,4p_{\text{оп}}$.

Моделирование изменения влажностного режима проводили с учетом процессов конвекции, диффузии и адсорбции на основании законов Фика, Навье–Стокса, Дарси. Полученная модель позволяет определить концентрацию влаги в любой части улья и пчелиного клуба при разных температурах и влажностях входящего в улей наружного воздуха. Общая модель

изменения влажности в улье, с учетом процессов диффузии и конвекции, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \nabla(-D_{\text{water}}\nabla c_{\text{water}}) + u\nabla c_{\text{water}} = 0, \\ j_1 = -D_{\text{water}}\nabla c_{\text{water}} + uc_{\text{water}} = 0, \\ 0 = \nabla(D_e\nabla c_{\text{water}}), \\ j_2 = -D_e\nabla c_{\text{water}}, \end{cases} \quad (3)$$

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; D_e – эффективная составляющая коэффициента диффузии.

Начальную концентрацию воды в воздухе на входе в улей и клуб определяли через влажностное содержание в зависимости от исходных температур наружного воздуха по соответствующим таблицам.

Эффективная составляющая диффузии в пористых средах (D_e) зависит от структуры пористого материала и проникающей фазы. Этот параметр определяли по Брюггеману: $D_e = (\varepsilon_p/\tau_1)D_{\text{water}}$, где ε_p – пористость материала, равная 0,67; τ_1 – коэффициент извилистости материала, $\tau_1 = \varepsilon_p^{-0,5}$.

Переменными параметрами являются диффузионные потоки, связанные с концентрациями влаги в различных местах модели, скоростями перемещения воздушных масс.

Таким образом, получили три математических модели (1, 2, 3), которые связаны между

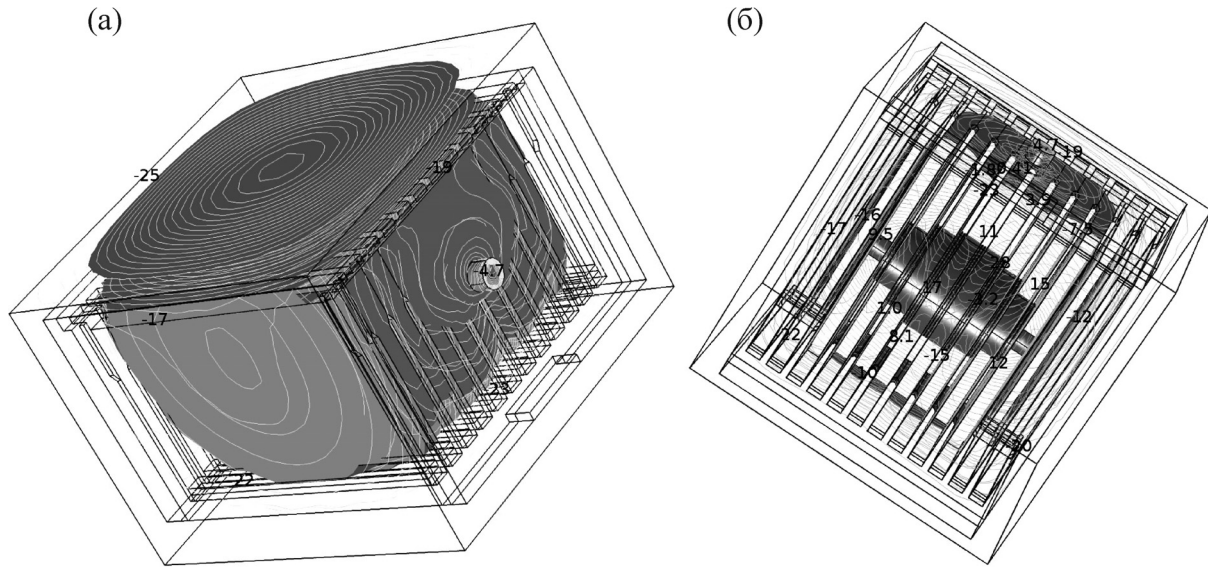


Рис. 2. Виды улья с изображениями температурных полей: (а) – вид сбоку, (б) – вид снизу.

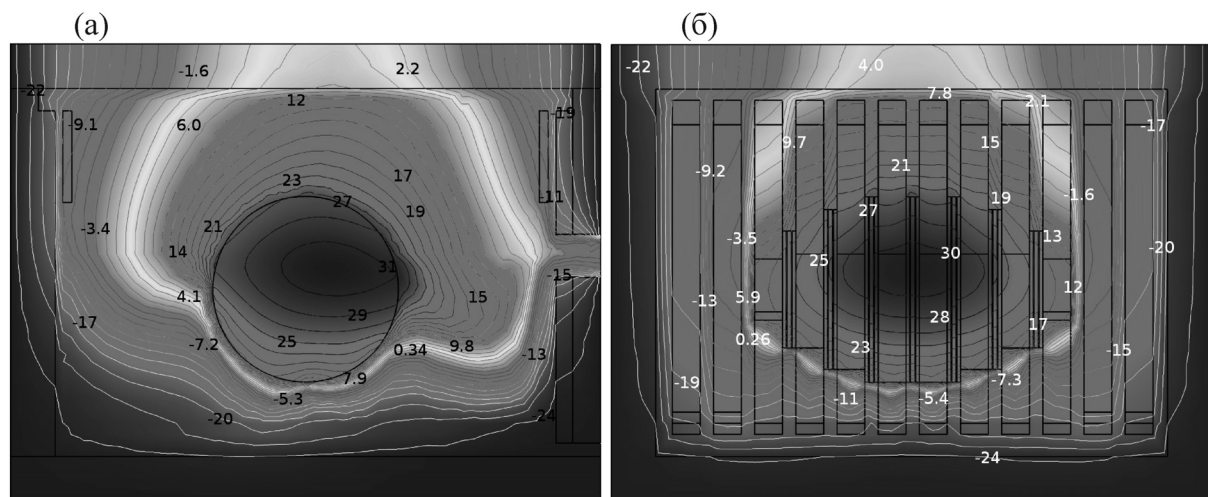


Рис. 3. Изображения температурных полей в разрезах через центр улья: (а) – перпендикулярно передней стенке и летку, (б) – параллельно передней стенке.

собой через физические параметры. Эти модели описывают основные протекающие в улье процессы: тепловые, влажностные, перемещение воздуха.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование стационарных режимов проводили для нескольких критических температур окружающего воздуха: -28 , -20 , -10 , -5 , 0 , 5 и 15°C . Для температуры -28°C были получены изображения температурных полей, представленные на рис. 2. Из рисунка видно, что внутри улья большой объем занимают отрицательные температуры, и их уровень довольно

значительный – от -15 до -20°C . Также можно увидеть, что температура клуба сохраняется на уровне $+29^{\circ}\text{C}$.

Если сделать сечение улья, то можно увидеть температурные поля (рис. 3). На рис. 3а видно, что часть тепла уходит наружу через центральный леток вместе с удаляемым пчелами воздухом. В полученных изображениях можно увидеть места, имеющие максимальную температуру. Данные рисунки подтверждают предположения о том, что наиболее низкие температуры имеют место в нижней части улья, а более высокие – в верхней.

Для более полного анализа изменения температуры внутри клуба было сделано выделение

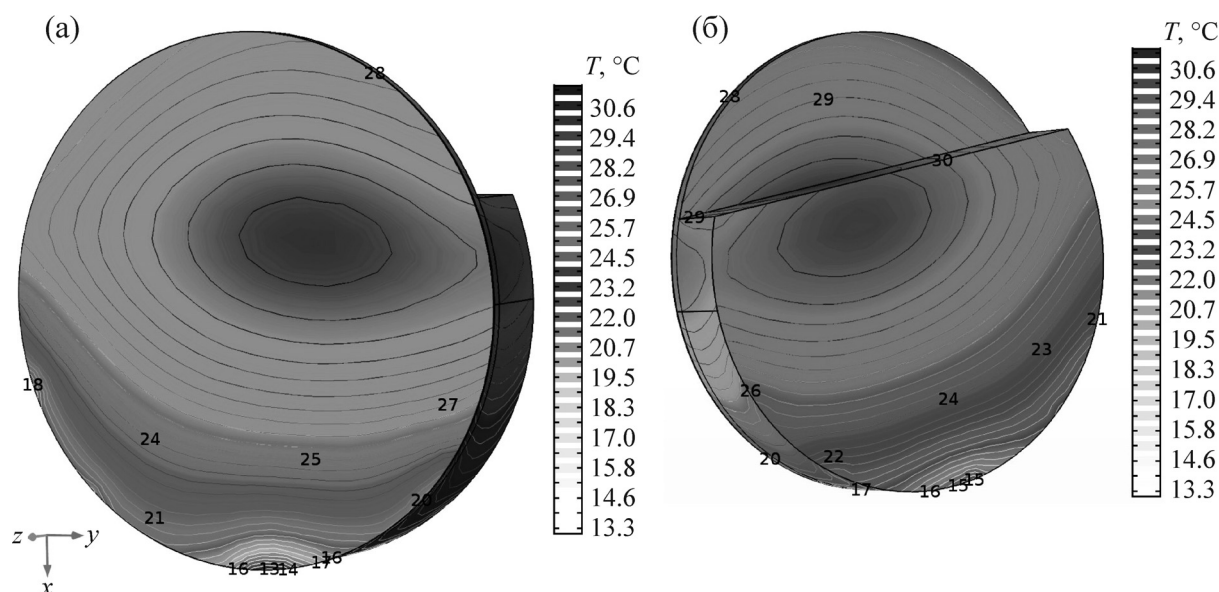


Рис. 4. Изображения температурных полей в различных видах фрагмента пчелиного клуба: (а) – со стороны улочки, (б) – со стороны сота.

отдельно его фрагмента (диск с пчелами, диск с воздушным промежутком и сегмент пространства, занимаемого пчелами в рамке) (рис. 4а, 4б). На данных рисунках видно, что на поверхности клуба самая низкая температура наблюдается в нижней его части и составляет 12–13°C, что соответствует всем предположениям. Нахождение зоны низкой температуры внизу объясняется тем, что пчелы втягивают поступающий воздух снизу, а за счет постоянной смены особой температура не опускается ниже критической (8°C).

Исследования показывают, что, несмотря на широкий диапазон изменения температуры за пределами клуба (от –28 до +15°C), внутри его поддерживается довольно стабильная положительная температура на уровне от 25 до 32°C. В клубе температура неравномерна, имеются очаги повышенных значений, но не более 34°C, что также подтверждается опубликованными ранее данными в литературе.

Определенный интерес представляют температурные поля при высоких значениях положительной температуре внешней среды. Так, при температуре +15°C наблюдалось распадение клуба на отдельные области (что и происходит на самом деле). При таких температурах пчелы начинают покидать клуб и мигрируют по гораздо большему объему улья.

Следующие исследования были посвящены анализу движения воздуха внутри улья. На рис. 5а, 5б показаны скорости и траектории движения воздуха с различных ракурсов при наружной температуре воздуха, равной –25°C.

Установлено, что скорость движения воздуха на входе в улей находится в пределах 0,01–0,02 м/с, а на выходе (в центральной летке) – 0,12 м/с. На рис. 5б по траекториям поступающего воздуха видно, что он поступает через нижний леток и далее распределяется по межрамочным пространствам и проходит также вдоль задней стенки.

Анализ траекторий и скоростей движения воздуха в отдельных фрагментах пчелиного клуба (рис. 6а, 6б) показывает, что внутри клуба скорости также неодинаковы. Так, с одной стороны внутри имеются зоны, где скорость воздуха составляет 0,15–0,17 м/с – это довольно высокие значения. С другой стороны, наименьшая скорость наблюдается на периферии клуба и в верхней его части, составляя 0,04–0,06 м/с, – это очень низкие значения. Такое распределение скоростей воздушного потока логично и с биологической точки зрения – на краю клуба пчелы находятся при низких температурах, и их жизненные процессы замедлены. Однако на краю клуба есть очаги высоких скоростей, через которые и поступает воздух вовнутрь скопления. В то же время внутри клуба температуры высокие и пчелы более активно вентилируют свое скопление. Как уже отмечалось, если только пчела, находящаяся в наружной корке клуба, сильно охлаждается, то она заходит вовнутрь, где согревается и опять набирает корм.

Для сравнения были просмотрены изображения скоростей и траекторий движения воздуха при разных температурах окружающего воздуха (от –28 до +15°C). Анализ скоростей

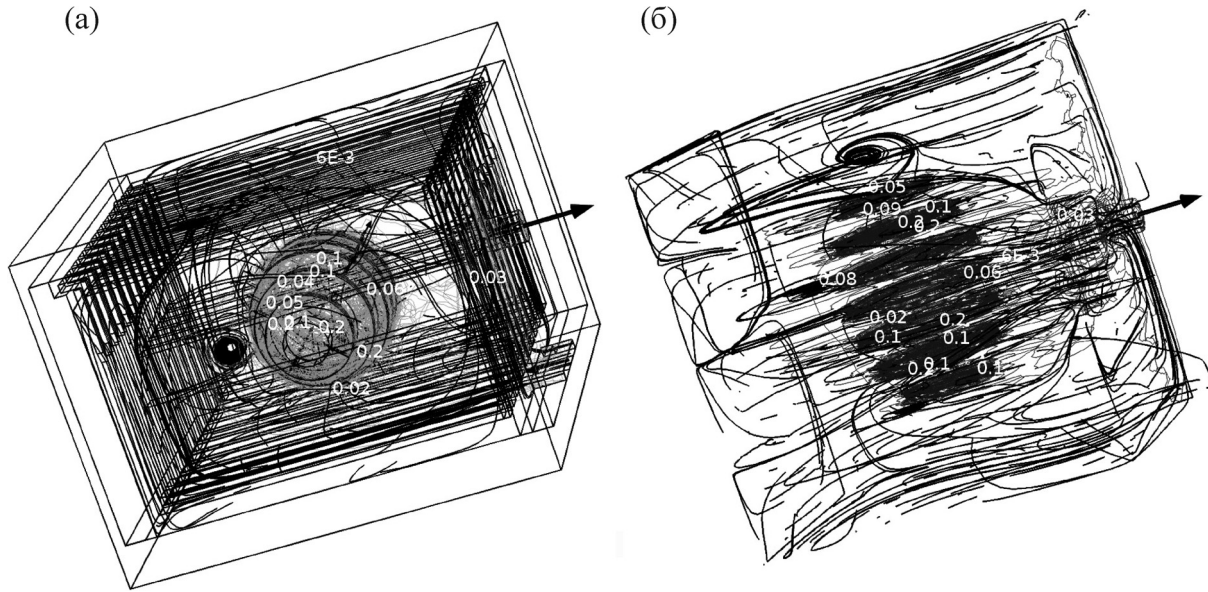


Рис. 5. Виды улья с изображениями скоростей воздуха внутри улья: (а) – вид сбоку, (б) – вид снизу.

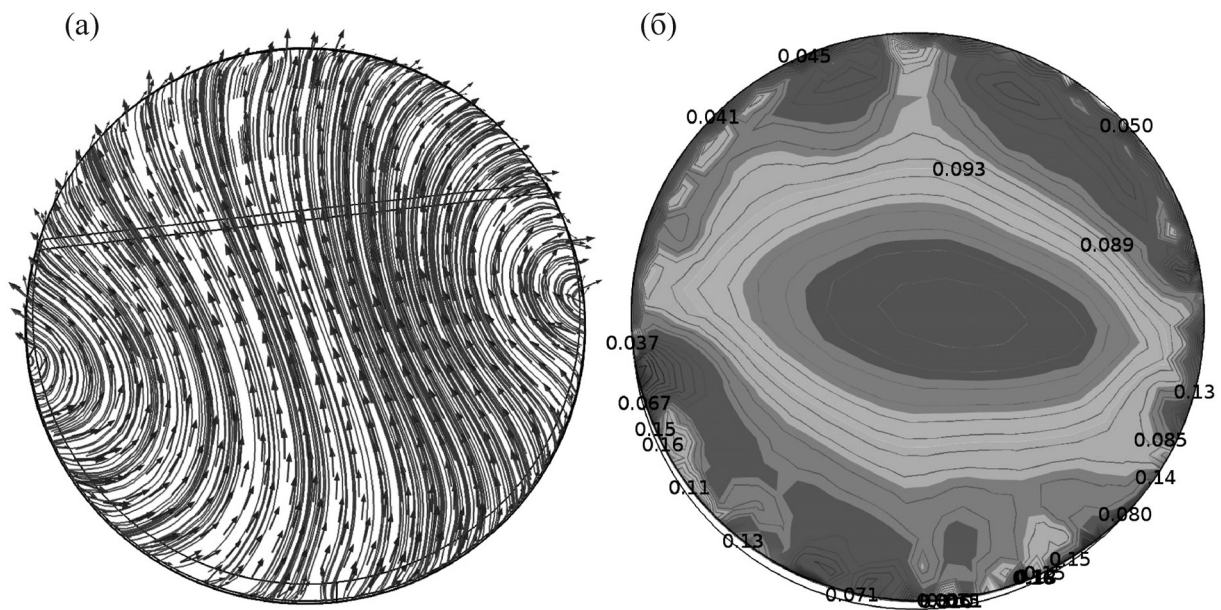


Рис. 6. Изображения траекторий и значения скоростей воздуха внутри фрагментов пчелиного клуба при температуре наружного воздуха минус 25°C: (а) – траектории движения воздуха, (б) – зоны равных скоростей.

движения воздуха внутри фрагментов пчелиного клуба при температуре наружного воздуха -5°C показал, что все скорости движения воздуха резко уменьшились (внутри до $0,01$ м/с, а по краям – до $6 \cdot 10^{-4}$ – $9 \cdot 10^{-4}$ м/с), также сократилась площадь, занимаемая высокими скоростями, практически остались только отдельные очаги. Понижение скоростей движения воздушных масс связано с сокращением воздухообмена. Скорости воздуха внутри клуба, в зависимости от наружной температуры, изменяются

более сильно: при температуре -28°C скорость составляла $0,27$ м/с, при 0°C – $0,005$ м/с. Анализ изображений распределения скоростей воздуха по центральной улочке и температуре наружного воздуха $+5^{\circ}\text{C}$ показал, что скорости воздуха за пределами клуба и внутри его становятся соизмеримыми. При такой температуре воздушные промежутки между пчелами увеличены и не требуется высокого значения напоров воздуха. Это наиболее комфортная температура

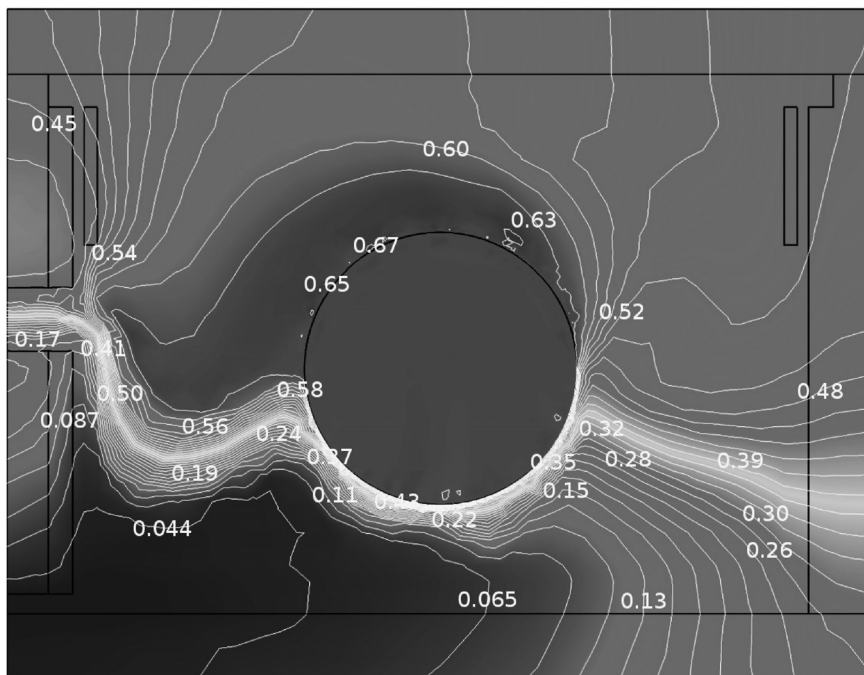


Рис. 7. Изображение сечения улья по центральной улочке с нанесением полей и значений концентрации влаги во внутреннем воздухе.

наружного воздуха для пчелиной семьи, и пчелы потребляют минимальное количество корма.

Исследования влажностного режима в улье показали, как внешний воздух поступает в улей через нижний леток и имеет концентрацию влаги около $0,04$ моль/м³, а вверху концентрация влаги составляет уже $0,5$ – $0,6$ моль/м³. Это происходит за счет вывода влаги из клуба. На рис. 7 показано сечение улья по центральной улочке с нанесением полей и значений концентрации влаги во внутреннем воздухе. Здесь видно, что наиболее высокая концентрация влаги находится внутри клуба и на выходе из него. Наиболее низкую концентрацию влаги имеет входной воздух и среда в нижней части улья.

Анализ изображений распределения концентрации влаги вместе с конструктивными элементами улья (дерево) доказывает, что деревянные элементы насыщаются влагой в соответствии с влажностью пограничного воздуха. Также можно наблюдать абсорбированную влагу в деревянных элементах улья, особенно в верхней его части, что соответствует действительности (наблюдается весной при открытии ульев).

Графики распределения концентраций влаги при различных температурах окружающего воздуха показывают следующее. Концентрация влаги внутри клуба постоянна и находится на уровне $0,62$ – $0,65$ моль/м³, а в верхней части улья изменяется от $0,65$ до $0,35$ моль/м³ (при

низких наружных температурах достигаются меньшие значения). При более низких температурах влажность поступающего и выходящего из улья воздуха имеет большое отличие, например, при температуре -28°C концентрация влаги входящего воздуха равна $0,1$ моль/м³, а на выходе из центрального летка – $0,5$ моль/м³. В то же время при температуре $+15^{\circ}\text{C}$ входной воздух имеет концентрацию $0,56$ моль/м³, а на выходе из центрального летка – $0,64$ моль/м³. Ситуация объясняется малым содержанием влаги во входном воздухе при низких температурах и большим потреблением меда пчелами, что приводит и к большому выделению воды в результате разложения меда. Пчелы при этом соответственно вынуждены увеличивать вентиляцию клуба.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных результатов моделирования сделаны следующие выводы. Полученные нами изображения и аналитические результаты тепловых характеристик хорошо согласуются с термограммами, полученными другими исследователями [9,10,11].

Система уравнений, описывающая взаимосвязь геометрических и теплофизических параметров зимнего клуба пчел с температурой окружающей среды, адекватна реальному поведению пчелиной семьи. Данные уравнения опи-

сывают поддержание параметров микроклимата внутри клуба пчел за счет изменения его геометрии, внутренней вентиляции, перемещения пчел из более нагретой части к периферии и обратно. Изображения температурных полей доказывают высокую теплоизолирующую способность пчел, можно наблюдать, как резко изменяется температура воздуха за пределами скопления пчел. Температурное поле по разрезу через четвертую рамку, считая от центральной улочки, показывает, что значительная часть тепла уходит наружу через центральный леток вместе с удаляемым пчелами воздухом. Анализ изменения температуры внутри клуба через его фрагмент подтверждает предположения о том, что на поверхности клуба самая низкая температура находится в нижней его части, и это соответствует литературным данным [7]. Анализ движения воздуха внутри улья показывает, что скорость движения воздуха на входе в улей минимальная, а на выходе (в центральном летке) – максимальная. Наиболее высокие скорости движения – выше 0,17 м/с – наблюдаются внутри скопления. Полученные скорости движения воздуха в отдельных фрагментах пчелиного клуба оправданы с биологической точки зрения – на краю клуба пчелы находятся при низких температурах, и их жизненные процессы замедлены. В то же время внутри клуба температуры высокие: пчелы находятся в более активном состоянии и более интенсивно вентилируют свое скопление. В зимний период, при особенно низких температурах (до -30°C), влажностный

состав в улье резко неоднороден: внешний воздух, поступающий в улей, имеет концентрацию влаги около $0,04$ моль/м³, а вверху концентрация уже составляет $0,5$ – $0,6$ моль/м³. Такое изменение во влажностном составе связано со значительным количеством удаляемой влаги из клуба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. К. Еськов и В. А. Тобоев, Зоол. журн. **90** (3), 335 (2011).
2. Е. К. Еськов и В. А. Тобоев, Биофизика **54** (1), 114 (2009).
3. В. А. Тобоев и М. С. Толстов, в *Сб. мат-лов Всероссийской научной интернет-конференции «Физические процессы в биологических системах»* (Казань, 2014), сс. 97–102.
4. В. А. Тобоев и М. С. Толстов, Наука и образование, № 3, 116 (2014).
5. А. И. Касьянов, Пчеловодство, № 2, 16 (2003).
6. А. Д. Трифионов, Пчеловодство, № 11, 21 (1990).
7. А. Ф. Рыбочкин и И. С. Захаров, *Компьютерные системы в пчеловодстве* (Курский гос. техн. ун-т, Курск, 2004).
8. С. В. Оськин и Д. А. Овсянников, *Электротехнологические способы и оборудование для повышения производительности труда в медотоварном пчеловодстве Северного Кавказа* (ООО «Крон», Краснодар, 2015).
9. В. А. Тобоев, Пчеловодство, № 1, 20 (2007).
10. S. Omholt, J. Theor. Biol. **128**, 219 (1987).
11. J. Watmough and S. Camazine, J. Theor. Biol. **176**, 391 (1995).

Modelling Main Physical Processes in Beehives

S.V. Oskin and D.A. Ovsyannikov

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

A winter bee community of 15000 bees, housed in the wooden beehive boxes with 12 frames was taken to analyze physical processes in beehives. The most important aspect of this research is to determine changes in the size of the colony cluster during the winter months and the relationship between temperature, humidity and airflow within the beehive. Modelling physical processes in hives was performed with Comsol 5.3 software package. The temperature readings on the thermal images confirm that bees produce heat very intensively and thus the hive body has good insulating protection. On the external surface of the colony cluster the temperature is $+12^{\circ}\text{C}$. Although the outside temperature of the colony cluster may change, the inside temperature of the cluster is stable and kept from $+25$ to $+32^{\circ}\text{C}$. The inside temperature is uneven, and increased temperature is recorded but it is not higher than $+34^{\circ}\text{C}$, and thus not dangerous to bees. The analysis of air flow shows that the air flow rate at the entrance to the beehive is $0,03$ – $0,1$ m/s, and in the central opening, $0,12$ – $0,17$ m/s. The highest velocity is registered inside the colony cluster (not higher than $0,19$ m/s). Humidity level in the beehive is the following: incoming air contains $0,04$ mol/m³ of moisture, outgoing air – $0,5$ – $0,6$ mol/m³. It is the result of elimination of moisture out of the bees' conglomeration. The images of moisture concentration distribution in hives prove the concordance between saturation rate of wooden walls and humidity of boundary air.

Keywords: bee, hive, temperature, humidity, air flow rate, modelling