

УДК 62-506: 591.181

ГЕНЕРАЦИЯ, ВОСПРИЯТИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДОНОСНОЙ ПЧЕЛОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Еськов Е.К.

*Российский государственный аграрный заочный университет, Москва,
e-mail: ekeskov@yandex.ru*

В обзоре анализируются механизмы генерации и использования в системе коммуникаций медоносной пчелы статического электричества. Рассматривается реагирование пчел на низкочастотные электрические поля промышленной частоты. Приводятся перспективы использования электрических полей для управления поведением пчел.

Ключевые слова: статическое электричество, низкочастотные электрические поля, трихотидные сенсиллы, поведение

THE GENERATION, PERCEPTION AND ISPOLZOVANIE HONEY BEES ELECTRIC FIELDS

Eskov E.K.

Russian state agrarian correspondence university, Moscow, e-mail: ekeskov@yandex.ru

The review examines the mechanisms of generation and use in the communications system of honeybees static electricity. Examines the response of bees to low-frequency electric field of industrial frequency. Given the prospects of using electric fields to control the behavior of bees.

Keywords: static electricity, low-frequency electric field, trioxides sensillae, behavior

Медоносная пчела выделяется в царстве животных и классе насекомых специфичностью образа жизни и разнообразием адаптаций к широкому спектру условий среды обитания. Это наряду со многими другими адаптациями достигается наличием у пчел мобильной акустической связи [3], использование которой обеспечивает минимизацию затрат энергии и времени на трофическое обеспечение, а в период социотомии – успешное переселение в новые жилища. В сложном комплексе внутринездовых коммуникаций пчелы наряду с тактильными, химическими и акустическими сигналами связи используют электрические поля (ЭП).

Генерация ЭП. Покровы тела пчел электризуются и удерживают на себе электростатический заряд. Это свойственно всем разнородным физическим телам, подвергающимся всевозможным взаимодействиям (трению, надавливанию, соударению и т.п.). В результате одно из взаимодействующих тел, присоединяющих электроны, приобретает отрицательный заряд, а отдающее – положительный. Накопление больших зарядов между телами приводит к возникновению между ними искровых разрядов. Они достигают между облаками десятков миллиардов вольт, а при пробуксовке резиновой ленты транспортера между лентой и роликом транспортера – до 45 кВ. Такие большие разряды обладают летальной эффективно-

стью для человека. Раздражение вызывают разряды, достигающие 3 – 5 кВ/см, при использовании синтетической одежды. Этим обуславливается необходимость нейтрализации статического электричества на производстве и в быту.

Пчелы приспособились использовать электростатическое электричество, накапливаемое на покровах тела. При прочих равных условиях величина заряда пчелы зависит от ее активности. При 70-80%-й внутриульевой влажности воздуха заряд малоподвижных пчел, находящихся на сотах, варьирует от –1.8 до +2.9 пКл. Очень активные пчелы-танцовщицы, сигнализирующие об обнаруженном источнике корма или других целей полетов, несут на себе положительный заряд, величина которого составляет в среднем 45 ± 4.3 пКл. Его максимальное значение может достигать 80 пКл [2].

На величину заряда активных пчел влияют свойства опорного субстрата и влажность воздуха. При 70%-й влажности у пчел, передвигавшихся по поверхности луженой жести длиной 5 см, заряд тела достигал 1.6 ± 0.1 пКл. В случае преодоления такого же расстояния по шелковой ткани заряд составлял 2.9 ± 0.4 пКл, по стеклу 5.6 ± 0.9 , по бумаге – 7.8 ± 0.8 , по шерстяной ткани – 11.7 ± 1.3 и по восковой поверхности – 11.4 ± 1.8 пКл. Повышению относительной влажности воздуха до 90%

сопутствует понижению заряда пчел примерно на порядок. При этом не обнаружено влияния на величину заряда пчел пролетаемого ими расстояния от источника корма до улья. В частности, у пчел, пролетавших 5 м, заряд находился на уровне $+0.98 \pm 0.13$ пКл. Он несущественно отличался у пчел, пролетавших 200 м, составляя $+0.96 \pm 0.13$ пКл.

Колебания брюшка заряженного тела пчелы порождает в окружающем пространстве изменения напряженности электростатического поля (рис. 1). Форма электрических колебаний, регистрируемых зондом, находящимся на расстоянии нескольких миллиметров от пчелы, зависит от его положения по отношению к движущемуся насекомому или частям его тела. При однократном изменении расстояния за период возвратно-поступательного движения пчелы, ее крыльев или брюшка относительно антенны зонда регистрируется один период колебания напряженности ЭП. Удвоение частоты его колебаний происходит, когда за один период возвратно-поступательного движения тела пчелы дважды меняется расстояние от нее до зонда (рис. 2). Подобно этому на особей, занимающих разное положение по отношению к заряженной пчеле, воспринимаются ими колебания ЭП.

Поскольку генерация звуков сопряжена с движением крыльев, то этому процессу обычно сопутствуют электрические колебания. Их величина зависит от заряда пчелы и амплитуды колебаний крыльев. На расстоянии 1 см от пчелы, машущей крыльями, например аэрирующей гнездо, напряженность ЭП составляет 0.52 ± 0.10 В/см, а над пчелой, генерирующей пульсирующие звуки, — 0.19 ± 0.05 В/см. Увеличению заряда на теле пчелы, генерирующей пульсирующие звуки, от 15 до 100 пКл амплитуда колебаний электрического поля возрастает в 2.3 раза. По частотно-амплитудным спектрам электрические и акустические колебания, генерируемые пчелой, совпадают.

Механизмы восприятия низкочастотных ЭП. В восприятии ЭП в разных биологических ситуациях участвуют специфические специализированные механорецепторы и/или неспецифические структуры. Один из механизмов восприятия ЭП основан на притяжении или отталкивании под действием кулоновских сил механорецепторных органов, реагирующих на смещение. Под действием низкочастотных ЭП колеблются волоски быстроадаптирующиеся трихоидных сенсилл, расположенных на голове и выполняющие роль фонорецепторов, а также антенны. Колебания антенн, очевидно, воспринимаются джонстоновыми органами.



Рис. 1. Звуковые (а) и электрические колебания (б), генерируемые пчелой-танцовщицей. На электрограмме низкочастотные колебания соответствуют колебаниям статически заряженного брюшка, высокочастотные — крыльев

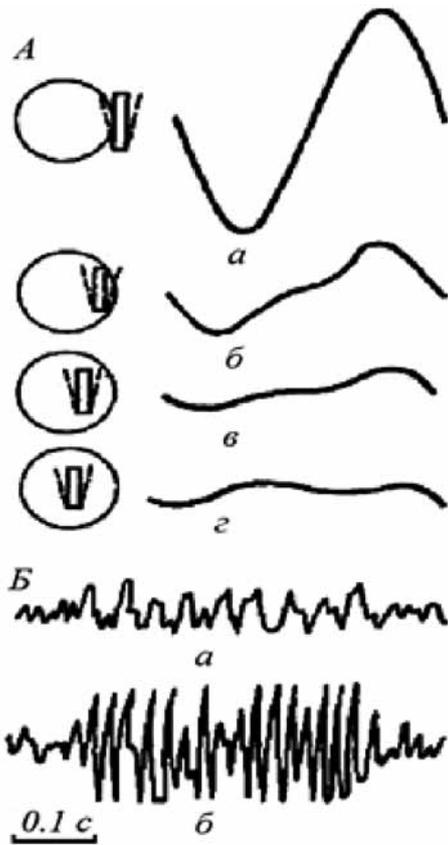


Рис. 2. Изменение структуры электрических колебаний, регистрируемых на расстоянии 0.5 – 1 см от пчелы (Б) или ее модели (А), в зависимости от положения зонда: А – ЭП, генерируемые колеблющейся моделью пчелы (а–г – разные положения зонда относительно модели); Б – ЭП, генерируемые пчелой-танцовщицей (а – зонд сбоку пчелы, б – зонд над пчелой)

Быстроадаптирующиеся трихоидные сенсиллы. Возбуждение колебаний волоска в электрическом и акустическом полях зависит от его формы, а также от амплитуды, частоты и продолжительности действия того или другого стимулов. Немаловажное значение имеет местоположение волоска на голове, а также их ориентация по отношению к вектору ЭП. Траектория колебаний кончика волоска может изменяться от прямолинейной до эллипсоидальной, что зависит от вектора напряженности ЭП, действующего на волосок. В случае эллипсоидальной траектории ее амплитуда в плоскости изгиба в 2–3 раза выше, чем в перпендикулярном ему направлении. Поскольку направления изгибов не имеют строгой упорядоченности, смежные волоски могут колебаться в разных направлениях.

Амплитуда колебания волоска имеет квадратичную зависимость от напряжен-

ности поля, варьирующего в пределах 50–500 В/см. При напряженности 50 В/см волосок отклоняется на $0.2 \pm 0.1^\circ$, при 200 В/см – на $0.8 \pm 0.1^\circ$ и при 500 В/см – на $4.9 \pm 0.3^\circ$. Изменение частоты ЭП от 1 до 3000 Гц при одинаковой напряженности слабо влияет на амплитуду колебаний волоска. Она уменьшается всего в 1.2 – 1.5 раза на повышение частоты от 10–80 до 500 Гц. У некоторых волосков наблюдается слабый резонансный максимум на частотах 10–80 Гц.

На амплитуду колебаний волоска влияет величина угла между вектором напряженности поля и продольной осью волоска, а также расстояние до электрода. При напряженности 500 В/см в ЭП частотой 20 Гц амплитуда отклонений волоска достигает максимума, когда этот угол равен 45° . С уменьшением угла отклонения волоска до 0° амплитуда его колебаний снижается на 40%, а при увеличении до 90° – полностью затухают. Но приближению к одному из электродов головы пчелы сопутствует увеличение амплитуды колебаний волосков. В ЭП частотой 20 Гц при напряженности 550 В/см сокращение расстояния между электродом и вершиной волоска от 1.30 до 0.13 мм отражается на возрастании амплитуды его колебаний примерно в 3 раза.

При неизменной напряженности и частоте поля, а также одинаковом положении головы относительно электродов частота и амплитуда колебаний волоска может изменяться. Это четко прослеживается при относительно большой амплитуде колебаний волоска (выше 10°) на частотах не ниже 100 Гц. В таких условиях через 10–15 мин действия ЭП амплитуда колебаний волоска возрастает более чем в 2 раза. Одновременно происходит 2-кратное уменьшение частоты его колебаний.

Десятиминутная ионизация воздуха в зоне локализации волоска униполярным ионизатором, создающим около 10^6 отрицательных ионов /см³, приводит к увеличению амплитуды его колебаний на 2–6%. Это указывает на то, что колеблющийся волосок незначительно электризуется трением о воздух [4].

Минимальная напряженность ЭП, отклоняющего волосок на 1° , составляет 200–250 В/см. Это происходит, если индивидуально изолированная пчела находится в однородном поле. Рост неоднородности ЭП с приближением волоска к электроду побуждает такое же его отклонение при меньшей напряженности поля. Согласно принципу зеркальных изображений, к такому же результату может привести сближение в ЭП двух пчел. В таком случае для отклонения волоска на 1° достаточно 70–100 В/см [4].

Поскольку такого отклонения волоска достаточно для возбуждения рецептора [1], то порог чувствительности одной изолированной пчелы к ЭП составляет 200–250 В/см, а двух со сближенными головами, например во время трофического контакта, – 70–100 В/см.

Антенны. Антенны, как и волоски, притягиваются к наэлектризованному диэлектрику, несущему на себе заряд любого знака. Притяжение антенн заряженным телом четко прослеживается у анестезированных пчел. Живые пчелы, напротив, отводят антенны от наэлектризованных тел, причем тем сильнее, чем ближе заряженное тело и/или выше его заряд. В отличие от этого приближаемое к пчелам незаряженное тело они ощупывают (прикасаются) антеннами.

Антенны, вероятно, могут воспринимать также относительно быстрые изменения напряженности ЭП. Частота ЭП, вызывающая максимальное отклонение антенн незаряженной пчелы, составляет около 50 Гц. У пчелы, заряженной любым знаком, эта частота вдвое выше, чем у незаряженной, что аналогично удвоению частоты колебаний незаряженного проводника по отношению к частоте воздействующего на него ЭП.

Амплитуда колебаний антенн в ЭП одной и той же частоты связана с напряженностью поля. При его частоте 50 Гц и напряженности 700 В/см антенна незаряженной пчелы отклоняется примерно на 3°, при 950 В/см – на 6°, при 1200 В/см – на 12 и при 1350 В/см – на 18° с увеличением заряда тела пчелы угол отклонения антенны под действием ЭП одной и той же частоты возрастает. В ЭП напряженностью 950 В/см антенны отклоняются примерно на 3, 10, 15, 18° соответственно росту заряда пчелы до 150, 400, 600 и 800 пКл.

Раздражение наведенными токами. Неспецифический механизм восприятия ЭП основан на раздражении наведенными токами, протекающими в местах контактирования пчел друг с другом и/или токопроводящими поверхностями. Частотная характеристика чувствительности к ЭП определяется в основном величиной наводимого им тока и эффективностью его контактного действия. Поскольку ток наводится в покровах тела, характеризующихся высоким сопротивлением, то величина наводимого тока нелинейно связана с частотой ЭП. Вероятнее всего, наводимый ток достигает максимума на частоте около 500 Гц, что согласуется с областью наибольшей чувствительности к ЭП. Ее снижению с повышением частоты сопутствует уменьшение чувствительности к току. Поэтому с повышением частоты за пределы 500 Гц порог восприятия поля резко возрастает. Вы-

сокая чувствительность к току на частотах ниже 500 Гц обуславливает относительно низкий порог к ЭП (рис. 3). Под действием постоянного ЭП ток не наводится. Поэтому пчел не раздражают ЭП постоянного тока.

Репеллентные эффекты. На пчел, находящихся за пределами улья, ЭП обладает репеллентным воздействием. Этому не препятствует трофическая мотивация пчел-фуражиров, наполняющих медовые зобики углеводным кормом. Взлет нескольких десятков пчел с кормушки с 50–60%-м раствором сахарозы в течение 3–10 с стимулирует ЭП напряженностью 40–60 кВ/м. При этом поведение пчел, летающих между электродами и за их пределами не имеет различий. Пчелы, не задерживаясь, влетают в ЭП высокой напряженности и свободно покидают его.

После отключения ЭП пчелы вновь собираются на кормушке через 0.5–1.5 мин. Последующие включения ЭП, подобно первому из них, стимулируют пчел взлетать с кормушки. Некоторые из взлетающих пчел возвращаются на кормушку в периоды включения ЭП. Но в таких условиях пчелы многократно прерывают наполнение зобиков и взлетают с кормушки.

Несмотря на сильное возбуждение, стимулируемое ЭП, пчелиные семьи не покидают обжитые ульи. Это происходит при воздействии на семьи, поселенные в наблюдательные ульи. Однорамочные ульи, в которых небольшие пчелиные семьи прожили в течение 1–3 суток, все пчелы вместе с маткой покидают за 6–11 мин под действием ЭП напряженностью 30–40 кВ/м.

ЭП грозовых разрядов. Приближению грозового фронта сопутствует повышение напряженности ЭП. В грозовых и слоистых облаках она достигает 10⁵ В/м. Возникновению грозового разряда на границах зон с высокой электрической плотностью предшествует повышение напряженности ЭП примерно до 10⁶ В/м. В радиусе 250 км от грозового фронта напряженность ЭП может достигать 2.5 кВ/м, в 50 км – 10 кВ/м [5].

Приближение грозового фронта стимулирует пчел-фуражиров возвращаться в улей и на некоторое время прекращать полеты. Это не имеет связи с изменением других метеорологических условий, предшествующих или сопутствующих изменению погоды. В частности, на летную активность не влияет повышение или понижение атмосферного давления, дневные колебания освещенности, связанные с изменением облачности, а также вариации влажности воздуха, если они не влекут за собой существенного уменьшения нектаровыделения. Пчелы могут продолжать полеты во время небольшого дождя, не сопровождаясь грозовыми разрядами.

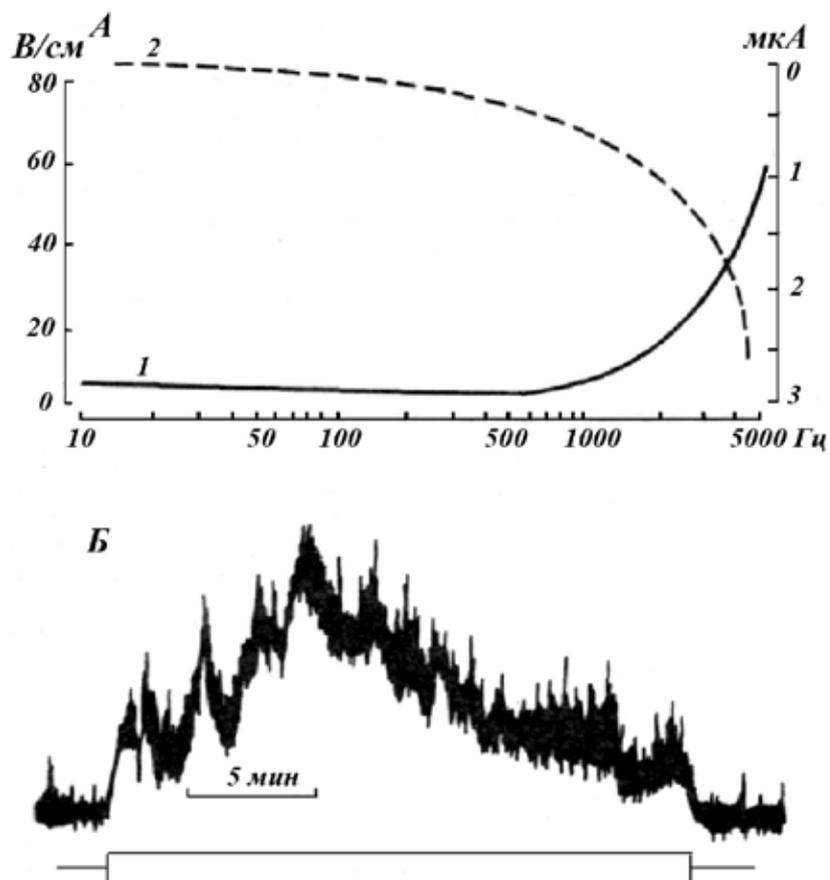


Рис. 3. Чувствительность пчел к ЭП и электротoku, проходящему через пчелу, наполняющую зобик 50%-м раствором сахара:

А – частотная характеристика чувствительности к ЭП (1) и электрическому току (2);

Б – изменение интенсивности звуков пчелиной семьи в полосе 400–500 Гц на действие ЭП частотой 500 Гц напряженностью 15 кВ/м

Перед грозой у пчел, наполняющих зобики, возрастает частота прерывания этого процесса [6], что обуславливается раздражением наведенными токами, возникающие под действием ЭП атмосфериков. Они, по-видимому, служат пусковыми стимулами инстинкта хоминга. Он получил развитие перед грозой, поскольку обеспечивает оптимальное реагирование пчел, находящихся за пределами жилища, на предвестники неблагоприятных для полетов изменений погоды.

Близость грозовых облаков может стимулировать повышение агрессивности пчел. Это наиболее вероятно в тех случаях, когда напряженность атмосфериков частотой около 10 кГц достигает 10 кВ/м. Повышение агрессивности пчел происходят при скачкообразных изменениях напряженности ЭП, повторяющиеся с интервалами от 0.5 до 1.2 мин. Их урежение или учащение влечет за собой понижение агрессивности пчел, что способствует удалению грозового фронта до 600–800 км [7].

Реакции на ЭП промышленной частоты. Аномалии по напряженности ЭП порожда-

ют высоковольтные линии электропередачи (ВЛ ЛЭП). Чаще всего по ВЛ ЛЭП передается ток частотой 50 или 60 Гц. Напряженность ЭП в зоне ВЛ ЛЭП зависит от приложенного к ним напряжения. На высоте 2 м от земли напряженность ЭП под ЛЭП-500 кВ составляет в среднем 6 кВ/м, под ЛЭП-750 кВ – 11 кВ/м и под ЛЭП-1500 кВ – 17 кВ/м. От этого величина тока, наводимого под ЛЭП. На теле одной пчелы под ЛЭП-750 кВ наводится примерно $3 \cdot 10^{-3}$ нА, под ЛЭП-500 кВ – $4 \cdot 10^{-4}$ нА. У скоплений пчел с увеличением их численности величина наведенного тока существенно возрастает.

Низкочастотные ЭП ЛЭП, активизируя пчел и дестабилизируют внутригнздовой микроклимат. Неравномерное распределение пчел в гнезде и неодинаковая их активность влияют на неравномерное изменение внутригнздовой температуры. Наибольшая ее дестабилизация, выражающаяся в спонтанных повышениях температуры, происходит со стороны летка. Так, в то время, когда улей находился в 20 м от крайней фазы ЛЭП-500 кВ (напряженность ЭП составляла

около 2 кВ/м), температура в нижней части межсотового пространства со стороны летка составляла в среднем 35.2, в центре – 35.5, в верхней части сот – 35.8°C. Через 3–5 ч после перемещения улья под крайнюю фазу ЛЭП (напряженность ЭП составляла около 7.6 кВ/м) температура в межсотовом пространстве со стороны летка повысилась до 40.1–40.4, в центре и верхней части гнезда – до 37.2–37.7°C. В течение последующих 10 суток температура спонтанно понижалась, а затем вновь повышалась. Ее превышение по отношению к исходному уровню составляло в среднем 3.1°C.

После удаления ульев от ВЛ ЛЭП происходила нормализация внутригнездовой температуры. Так, семья, находившаяся в течение 1.5 месяца под крайней фазой ЛЭП-500 кВ, реагировала понижением температуры в разных зонах гнезда на 1.4–5.3°C после ее перемещения в течение суток всего на 7 м от линии. За последующие 2 дня улей был постепенно отставлен от нее на 14 м (напряженность 3.2 кВ/м) и температура в нем, понизившись на 3.9–6.1°C, не выходила за пределы 34.8–36.4°C.

Размещение пчелиных семей под ВЛ ЛЭП модифицирует суточную динамику внутригнездовой температуры. В норме она повышается в дневные часы и понижается в ночные, а под ВЛ ЛЭП происходит противоположная сточная изменчивость температуры, что связано преимущественно с изменениями численности пчел в гнезде. С уменьшением в начале дня пчел в улье сокращается тактильное контактирование между ними и соответственно ослабляется раздражающее действие ЭП, так как величина наводимого им тока находится в прямой зависимости от численности контактирующих пчел. После завершения полетов пчел их численность в гнезде и вероятность тактильных контактов возрастает. Соответственно этому возрастает раздражающая эффективность ЭП. По указанным причинам температура в центре гнезд семей под ЛЭП в конце дня повышалась на 0.3–0.5 и у летка – на 0.7–1.5°C.

Повышению локомоторной активности и интенсификации метаболизма сопутствует увеличение потребления O_2 и выделение CO_2 . Соответственно этому в гнездах семей, расположенных под ВЛ ЛЭП-500 кВ, поддерживался относительно высокий уровень концентрации CO_2 , превышающей таковую в 55 м от линии в 2–6 раз.

Заклучение. Пчелы приспособились использовать электростатические поля, наводимые на покровах тела, в системе внутригнездовых коммуникаций. Для локализации в жилище пчел-сигнальщиц мобилизуемые ими пчелы ориентируются по отклонению

под действие кулоновских сил быстроадаптирующиеся трихоидных сенсилл и антенн. Этим достигается мобильность использования кормовых ресурсов.

Наведенные токи раздражают пчел. Это используется ими в качестве сигнала, оповещающего о приближении грозового фронта, побуждающего пчел прекращать фуражировку и возвращаться в свои жилища до наступления погоды, неблагоприятной для полетов. В других биологических ситуациях пчелы не имеют выраженных адаптаций на раздражение наведенными токами. Высокая вариабельность чувствительности к ним связана со множеством случайных факторов. К ним относится изменчивость величины контактного тока. Она во многом зависит от электропроводности контактирующих поверхностей, которая определяется их свойствами и состоянием. В местах контакта могут находиться вещества различной электропроводности: корм, частицы пыли, воска, прополиса и т.п.

С увеличением общей массы агрегирующихся пчел возрастает величина наводимого тока. В зонах скопления пчел создаются значительные локальные градиенты напряженности, которые можно рассматривать как вторичные поля, выступающие в роли дополнительных стимуляторов возбуждения. По этой причине взаимные ужаления происходят в местах больших скоплений пчел. Повышению их агрессивности способствует наличие в ЭП токопроводящих тел. Рефлекс ужаления стимулирует даже изолированный проводник, на который подается напряжение, составляющее всего несколько десятков вольт.

Раздражение пчел наведенными токами можно использовать в качестве репелентного фактора. Разогрев пчел в низкочастотном ЭП и повышение их локомоций перспективны для борьбы с клещом, паразитирующим на развивающихся и взрослых особях. Пользуясь низкочастотным электрическим у пчел можно вырабатывать отрицательный условный рефлекс на различные стимулы.

Список литературы

1. Еськов Е.К. Фоторецепторы медоносной пчелы // Биофизика. – 1975. – Т. 20. № 4. – С. 646–651.
2. Еськов Е.К. Специфичность реагирования на электрические поля и их использование биообъектами разной сложности // Успехи совр. биологии. – 2003. – Т. 123. № 2. – С. 195–200.
3. Еськов Е.К. Генерация, восприятие и использование акустических и электрических полей в коммуникациях медоносной пчелы // Биофизика. 2013. Т. 58. Вып. 6. С. 1051–1064.
4. Еськов Е.К., Миронов Г.А. Механизмы колебаний волоска трихоидной сенсиллы насекомого в низкочастотном электрическом поле // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 309. № 1. – С. 233–236.
5. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 422 с.
6. Schua L. Untersuchungen über den Einfluss meteorologischer auf das Verhalten der Honigbienen (*Apis mellifera*) // Zeit. Vergl. Physiol. 1952. Bd. 34. S. 258–277.
7. Warnke U. Physikalisch-physiologische Grundlagen zur luftelktrisch bedingten "Wetterfühligkeit" der Honigbiene (*Apis mellifera*). Dis. Math. Nat. Fak. Univ. Saarländes. Saarbrücken. 1973. 114 p.