

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 595.782.082.26
DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_4_39

**Биореактор для интенсификации процесса культивирования
и сортировки насекомых на примере *Galleria mellonella***

**Владислав Васильевич Соколов¹, Анастасия Сергеевна Осокина²✉,
Владимир Вениаминович Касаткин³**

^{1,3}Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

²anastasia.osokina2017@yandex.ru✉

Аннотация. Потенциал АПК можно раскрыть, привлекая ресурсы из нескольких отдельных или смежных отраслей на основе интенсификации производства. Поиск перспективных источников биосырья для получения сельхозпродукции является важным стратегическим направлением устойчивого развития аграрной сферы. В настоящее время к таким источникам можно отнести насекомых, для массового культивирования которых в промышленных масштабах используют различные установки. Рассмотрен технологический цикл культивирования и сортировки высококачественного биосырья – личинки восковой моли, основанный на принципе поддержания определенного температурного градиента с помощью конвективного теплообмена. Исследования включали следующие этапы: разработку конструкции, изготовление макетного устройства для культивирования и сортировки личинок; сравнительную оценку эффективности с прототипом (в лабораторных условиях); анализ показателей качества полученного биосырья и временного температурного градиента. Определен оптимальный режим работы, при котором цикл развития личинок в экспериментальной установке (ЭУ, получен патент на полезную модель) происходит быстрее на 15%, что ускоряет процесс культивирования. Выявлено, что масса личинок в ЭУ достоверно на 42% больше, чем в установке без применения электротехнологий. Второй этап технологического цикла заключался в сортировке личинок от корма, паутины и продуктов жизнедеятельности, для чего необходимо создавать оптимальный режим нагрева: на 1-м этапе культивирования нагрев производится до 40°C при экспозиции 8 дней, на 2-м этапе сортировки – до 55°C при экспозиции 20 мин. нагрев от процесса культивирования до процесса сортировки (40 → 55°C) занимает 60 мин. За это время 100% личинок переходит в контейнер, при этом сбор биосырья в ЭУ в 4 раза выше, т. е. разработанная ЭУ имеет более высокую экономическую эффективность по сравнению с прототипом. Предлагаемая технология позволяет эффективно решать проблему культивирования и сортировки личинок *G. mellonella* с регуляцией температурного режима и влажности.

Ключевые слова: личинки восковой моли, биореактор, конвективный теплообмен, температурный градиент, культивирование, сортировка, экономическая эффективность

Для цитирования: Соколов В.В., Осокина А.С., Касаткин В.В. Биореактор для интенсификации процесса культивирования и сортировки насекомых на примере *Galleria mellonella* // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 4(71). С. 39–48. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_4_39–48.

ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRIC EQUIPMENT
IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Bioreactor for intensification of the process of cultivation
and sorting of insects on the example of *Galleria mellonella***

Vladislav V. Sokolov¹, Anastasia S. Osokina², Vladimir V. Kasatkin³

^{1,3}Izhevsk State Agricultural Academy

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

²anastasia.osokina2017@yandex.ru✉

Abstract. The potential of the Agro-Industrial Complex can be revealed by attracting resources from several separate or related industries based on the intensification of production. The search for promising sources of bio-raw materials for obtaining agricultural products is an important strategic direction for the sustainable development of the agricultural sector. At present or in the future such sources include insects, for the mass cultivation of which

various devices are used on an industrial scale. The authors considered technological cycle of cultivation and sorting of high-quality bio-raw material, larvae of wax moth in particular, based on the principle of maintaining a certain temperature gradient using convective heat transfer. The research included the following stages: design development, manufacture of a mock-up test sample for cultivating and sorting of larvae; comparative evaluation of efficiency with a prototype (in laboratory conditions); analysis of the quality indicators of the obtained bio-raw materials and the time temperature gradient. The optimal operating mode has been determined, in which the development cycle of larvae in an experimental setup (a patent-protected ES) is 15% faster, which accelerates the cultivation process. It was revealed that the mass of larvae in the ES is by 42% greater than in the setup without the use of electrical technologies. The second stage of the technological cycle consisted in sorting larvae from feed, cobweb and waste products, for which it is necessary to create an optimal heating mode: at the first stage of cultivation, heating is carried up to 40°C an exposure of 8 days, at the second stage of sorting up to 55°C with an exposure of 20 minutes, heating from the cultivation process to the sorting process (40 → 55°C) lasted 60 minutes. During this time, 100% of the larvae overpass into the container, due to this fact the collection of bio-raw material in the ES is 4 times greater, i.e. the developed ES is characterized by higher economic efficiency as compared to the prototype. The proposed technology makes it possible to effectively solve the problem of cultivation and sorting of *G. mellonella* larvae with temperature and humidity regulation.

Keywords: larvae of wax moth, bioreactor, convective heat exchange, temperature gradient, cultivation, sorting, economic efficiency

For citation: Sokolov V.V., Osokina A.S., Kasatkin V.V. Bioreactor for intensification of the process of cultivation and sorting of insects on the example of *Galleria mellonella*. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(4):39-48. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_4_39-48.

Введение

Агропромышленный комплекс России является многоотраслевой системой, которая включает в себя более 60 отраслей и подотраслей: сельское хозяйство, пищевую и биологическую промышленность, пищевое, сельскохозяйственное и автотракторное машиностроение, производство химических удобрений, средств защиты растений, ветеринарную и санитарно-эпидемиологическую службы и т. д. Потенциал АПК можно раскрыть, привлекая ресурсы из нескольких отдельных или смежных отраслей на основе интенсификации производства.

Поиск перспективных источников биосырья для получения сельскохозяйственной продукции является важным стратегическим направлением дальнейшего развития. В настоящее время к таким источникам можно отнести насекомых. Для массового культивирования насекомых в промышленных масштабах используют различные установки [4, 5, 6].

Исследователями предлагаются различные конструкции устройств, которые в основном имеют горизонтальное и вертикальное расположение. Биореактор для культивирования и сортировки предназначен для выращивания и автоматизированного извлечения из питательного субстрата личинок большой восковой моли (ЛБВМ). Указанная цель достигается использованием в биореакторе двух режимов нагрева: обычного, равномерного для выращивания ЛБВМ и градиентного для автоматизированного извлечения ЛБВМ. Градиентный режим реализуется по окончании цикла выращивания ЛБВМ путем конструктивного разделения камеры биореактора при помощи перегородки на рабочий и вспомогательный объемы, причем рабочий объем прогревается неравномерно, так, что ЛБВМ собираются в устройстве сбора (лотке) во вспомогательном объеме [1]. Это позволяет значительно снизить трудоемкость извлечения личинок из питательного субстрата.

По литературным данным выращивание *G. mellonella* в лабораторных условиях подразумевает соблюдение трех основных правил: поддержание постоянной температуры 30–32°C, относительной влажности 60–70%, постоянной темноты [7–11]. Полный цикл развития насекомого составляет в среднем 40–50 дней. Для успешного производства биоматериала в промышленных условиях требуется соблюдение правила непрерывности культивирования и сортировки личинок. Проблема возникает на этапе сортировки, так как этот процесс осуществляется вручную, что замедляет технологический цикл получения биосырья. Особенностью сортировки является необходимость отделения от личинок паутины, продуктов жизнедеятельности и корма.

Цель нашей работы: разработать устройство с непрерывным технологическим циклом культивирования и сортировки личинок *G. mellonella* с дальнейшим использованием в медицине и агропромышленном комплексе.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились на базе Ижевской государственной сельскохозяйственной академии и Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук и включали следующие этапы:

- разработку конструкции;
- изготовление макетного устройства для культивирования и сортировки личинок;
- оценку эффективности работы устройства в лабораторных условиях в сравнении с прототипом;
- анализ показателей качества полученного биосырья и временного температурного градиента.

Объект исследований – личинки *G. mellonella* (личинки большой восковой моли – ЛБВМ).

Для объективной оценки работы устройства с одной маточной культуры были взяты имаго в равном количестве самцов ($n = 20$) и самок ($n = 20$) для оплодотворения и откладки яиц, расположенные на рамки контрольной группы (КГ) и экспериментальной группы (ЭГ).

Контрольная группа (КГ) личинок располагалась в неотапливаемом устройстве с 5 горизонтальными рамками, расстояние между ними 1,5 см. Экспериментальная группа помещалась в устройство, в котором рамки с пчелиной сушью располагались в касете горизонтально, расстояние между ними составляло 1,5 см.

В опытах использовали пленочные электронагреватели, которые находятся на внешней поверхности боковых стенок разработанного устройства. Основной перенос тепла в устройстве осуществляется за счет конвективного теплообмена. Стрелочками показаны воздушные конвекционные потоки. Длина стрелок на этом рисунке не отражает интенсивность этих конвекционных потоков.

Упрощенная схема для моделирования устройства (вид сбоку без боковой стенки) представлена на рисунке 1.

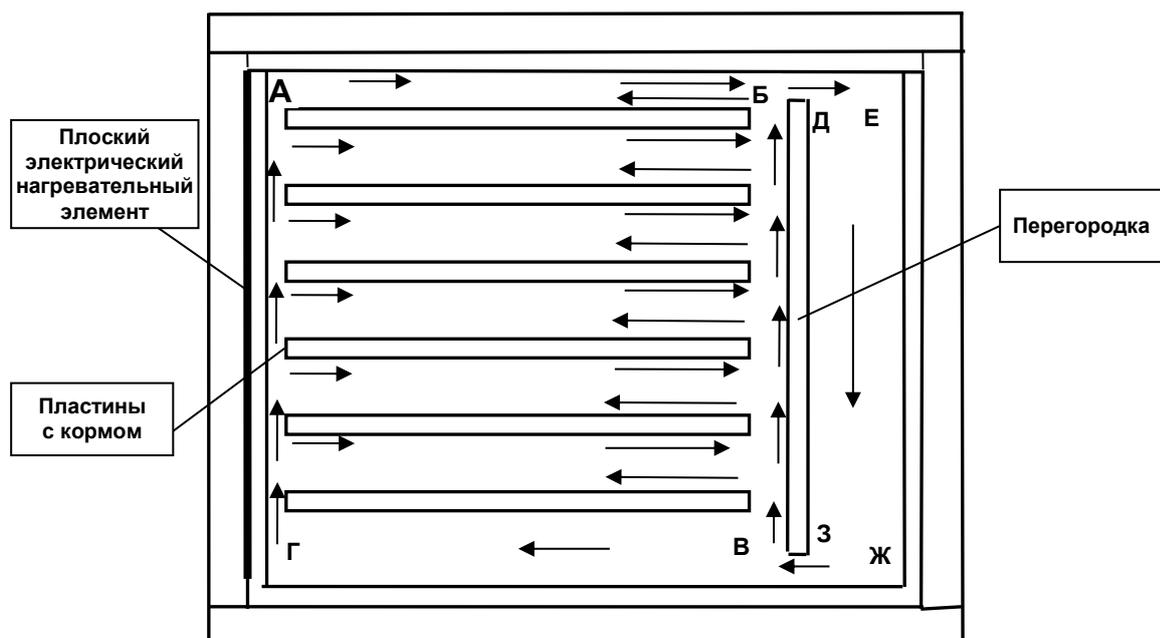


Рис. 1. Упрощенная схема для моделирования устройства

Если тепловые потоки будут эквивалентны электрическому току, то разность температур будет эквивалентна разности потенциалов, а количество переносимого тепла – количеству электричества (табл. 1).

Таблица 1. Соотношение аналогий электрических и тепловых параметров

Электрическая цепь			Тепловая цепь		
Наименование	Обозначение, формула	Ед. изм.	Наименование	Обозначение, формула	Ед. изм.
Удельное сопротивление	ρ	(Ом·м ²)/м или Ом·м	Удельная теплопроводность	λ	Вт/(м·К)
Электрическое сопротивление	$R = \rho \cdot (1/S)$	Ом	Тепловое сопротивление	R_t	С°/Вт
Ток	I	Ампер	Тепловой поток	P	Вт.
Напряжение	V	Вольт	Перегрев	θ	К, С°
Потенциал	ϕ	Вольт	Температура	T	К, С°

Расчет плотности теплового потока производится по формуле

$$P_i = S_i p, \quad (1)$$

где P_i – энергетический поток в пространстве между пластинами;

S_i – площадь стенки между пластинами;

p – плотность энергетического потока.

Необходимо соблюдать условие однородности как по всему объему устройства, так и по всему эксперименту, т. е. на всех этапах: начиная с культивирования личинок и заканчивая их сортировкой.

В соответствии с особенностями конвекционного движения воздушного потока он будет лимитироваться воздушными зазорами. При этом при движении с нижнего уровня устройства к верхним уровням в этот воздушный поток будут добавляться тепловые потоки, проходящие от нагревателя через воздушные промежутки между пластинами с кормом, поэтому тепловой поток будет выражаться формулой (2)

$$P_{Rk_i} = \sum_{j=1}^i P_{RS_j}, \quad (2)$$

где P_{Rk_i} – суммарный тепловой поток через Rk_i ;

P_{RS_j} – тепловые потоки с нижних уровней устройства начиная с первого.

Тепловые потоки будут приводить к наращиванию температуры в виде перегрева на все более высоких уровнях устройства, которое будет определяться по формуле (3)

$$\theta_{Rk_i} = \sum_{j=1}^i R_{k_i} P_{RS_j}, \quad (3)$$

где θ_{Rk_i} – величина температуры перегрева от теплового потока как суммы тепловых потоков с нижних уровней.

Из выражения (3) видно, что после каждого уровня происходит нарастание перегрева, которое, в общем-то, не зависит от теплового сопротивления промежутка между пластинами с кормом и определяется тепловым потоком непосредственно с нагревателя. С другой стороны, перегрев определяется суммой потоков с нижних уровней, и чем больше уровней, тем больше суммарное нарастание:

$$\theta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i R_{k_i} P_{RS_j}. \quad (4)$$

С помощью выражения (4) определяют температуру перегрева в точке на выходе с пластин с кормом, а выражения (5) – итоговый перегрев в верхней точке устройства для Rk_i .

Так как итоговый перегрев отсчитывается от точки отвода тепла с пластины с кормом, то есть правой точки, то эта точка является своего рода пьедесталом, от которого отсчитывается перегрев левой точки пластины с кормом. Тогда итоговый перегрев для левой зоны каждой пластины будет определяться как сумма перегревов по формуле (5)

$$\theta_{\text{сумм}i} = P_{Si} + \sum_{j=1}^i R_{k_i} P_{Rs_j} . \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что для создания наиболее однородных условий и градиента температуры необходимо уменьшать тепловое сопротивление, в идеале делая его нулевым. Этого можно достичь увеличением зазора между пластинами с кормом и перегородкой.

Таким образом, представленная модель устройства позволяет регулировать его свойства и искать оптимальное соотношение градиента температуры и элементов конструкции.

Результаты и их обсуждение

Культивирование

Наиболее близкой конструкцией биореактора к предлагаемому решению для культивирования личинок *G. mellonella* является устройство «Молярый» по типу термостата. Эта конструкция представляет собой термоизолированный короб, снабженный двумя электрическими нагревателями, расположенными на противоположных сторонах короба для обеспечения однородности нагрева. В нем создается необходимая для развития личинок *G. mellonella* температура, темнота и влажность [2].

Недостатком выбранного наиболее близкого решения (как и всех ранее рассмотренных аналогичных решений) является то, что личинки *G. mellonella*, развиваясь, плетут паутину, биологически необходимую при их естественном развитии – для защиты от пчел. Эта паутина соединяет между собой все части питательного субстрата и экскрементов личинок *G. mellonella*, превращая его в сплошной ковер, внутри которого и живут личинки большой восковой моли. Обычно для извлечения личинок *G. mellonella* ковер, в котором личинки укрывают себя от неблагоприятных для них факторов, необходимо разрушать. В наиболее близкой конструкции биореактора само извлечение производят вручную после выращивания ЛБВМ, что является очень кропотливой и трудоемкой операцией.

Авторами была поставлена задача создания полезной модели устройства, которое бы максимально соответствовало биологии развития личинок *G. mellonella* в лабораторных условиях и облегчало бы извлечение личинок *G. mellonella* из субстрата по завершении процесса их выращивания.

Первая часть эксперимента заключалась в изучении процессов жизнедеятельности личинок при культивировании в разных устройствах при разных температурных условиях. Из предыдущих экспериментов было установлено, что градиент температуры, при которой личинки активно передвигались к открытой перегородке в холодное отделение, составляет 45–55°C. Замечено, что при температуре 40°C личинки остаются на сотовых рамках, активно питаются, поэтому данный градиент был взят в ЭГ. Схема эксперимента представлена в таблице 2.

Таблица 2. Постановка эксперимента по изучению процессов жизнедеятельности личинок *G. mellonella* в разных устройствах на этапе культивирования

Группа	Температура, °C	Влажность, %	Расположение рамок
Контрольная	30	70	Вертикально
Экспериментальная	40	70	Горизонтально

Температура в ЭГ поддерживалась в диапазоне 40°C инфракрасным обогревателем типа ПЛЭН с помощью терморегулятора. Относительная влажность (60–70%) в КГ и ЭГ контролировалась гигрометром и поддерживалась за счет регулярного сбрызгивания водой рамок из ручного пульверизатора. Эксперимент производили в трехкратной повторности.

Полученные данные подвергали статистической обработке методами вариационной статистики с проверкой достоверности результатов с помощью критерия Стьюдента и уровня значимости (P) на персональном компьютере с использованием пакета прикладной программы MS OFFICE (Microsoft Excel).

В период наблюдения за процессами жизнедеятельности личинок на этапе культивирования измеряли их морфофизиологические показатели, изучали поведенческие реакции. Исследования показали, что развитие личинок в ЭГ проходит быстрее, чем в КГ (табл. 3).

Таблица 3. Морфофизиологические показатели личинок, культивированных в разных устройствах

Показатели	Масса	Длина	Головная капсула
	мг	мм	
Контрольная группа			
X ± m	0,12 ± 0,005	1,87 ± 0,036	2,15 ± 0,04
Cv,%	32,51	15,22	12,05
Экспериментальная группа			
X ± m	0,17 ± 0,005*	1,92 ± 0,036*	2,36 ± 0,04*
Cv,%	20,45	11,99	4,37

Примечание: * – P ≤ 0,001.

Отмечены достоверные превышения показателей личинок ЭК по сравнению с КГ: масса личинок – на 0,05 мг; длина личинок – на 0,05 мм; головная капсула личинок – на 0,21 мм, что соответствует VII возрасту (некоторые личинки готовились к окукливанию). В ЭГ личинки активно питались, не расплзались по ящику.

По данным таблицы 3 можно сказать, что в ЭГ личинки развиваются активнее и быстрее достигают стадии куколки.

Сортировка

Вторая часть эксперимента заключалась в изучении процессов сортировки личинок *G. mellonella* при разных температурных условиях.

Эффективность сортировки личинок оценивалась сразу же после окончания эксперимента по культивированию, при открытии перегородки в сортировочный контейнер. Температура в ЭГ повышалась до 55°C при экспозиции 20 минут. Эксперимент ставился в трехкратной повторности. Схема эксперимента представлена в таблице 4.

Таблица 4. Постановка эксперимента по изучению оптимальных условий для сортировки личинок *G. mellonella* в теплом отделении

Температурный градиент, °С	Экспозиция, мин.	Расположение личинок на рамках
45 – контроль	10, 15, 20	1. Верхняя рамка (n = 20) 2. Нижняя рамка (n = 20) 3. Верхняя, средняя и нижняя рамки (n = 60)
35		
50		
55		
60		

Серия экспериментов по изучению предельной температуры для процессов жизнедеятельности личинок *G. mellonella* показала, что при градиенте температуры 45–55°C, личинки начинали активно перемещаться в контейнер. Следовательно, при температуре до 45°C и при влажности 70% личинкам комфортно, они активно питались, не расплозились по коробу, не переходили обратно в холодное отделение. Экспериментально доказано, что нагрев от процесса культивирования до процесса сортировки (от 40 до 55°C) занимает 60 мин. За это время 100% личинок переходят в контейнер.

По истечении срока созревания личинок *G. mellonella* боковые нагреватели выключаются, а нагреватель на боковой стенке включается в режим повышенной мощности так, что температура у короткой стенки, где расположен этот нагреватель, постепенно повышается до 50–55°C и выше, при этом во вспомогательном объеме за перегородкой температура будет более низкая, потому что он не обогреваем. В результате этого создается градиент температур вдоль биореактора, который побуждает личинок *G. mellonella* перемещаться в более холодный вспомогательный объем биореактора.

В конечном итоге личинки перемещаются в еще более холодную часть биореактора, которая является лотком для сбора личинок. На этом производственный цикл выращивания личинок заканчивается. Контейнер с пластинами, на которых находятся остатки корма с экскрементами личинок, извлекается через верхнюю крышку биореактора, и может загружаться очередная партия корма и личинок для выращивания.

Доказано, что оптимальный градиент температуры сортировки личинок составляет 50–55°C при экспозиции 15–20 минут, при этом более 98% личинок перемещается в холодное отделение. Согласно экспериментальным данным, оптимальная температура для сортировки составляет 55°C при времени 20 мин., все личинки переходят в контейнер, вне зависимости от их количества. Также можно сделать вывод, что уровень выживаемости личинок по разработанной технологии достигает 100%, все личинки переходят в холодное отделение, где их можно отсортировать в контейнер. Гипотеза группы ученых [3] о влиянии факторов, формы, геометрии пространства подтвердилась, поскольку личинки оказались по краям холодного отделения, а не в центре. Благодаря такой конструкции можно реализовать два технологических режима выращивания личинок *G. mellonella*.

В начале технологического цикла производится создание оптимальных условий, когда обеспечивается оптимальный равномерный прогрев запатентованной полезной модели биореактора [1], а при завершении технологического первого цикла, когда личинки *G. mellonella* достигли необходимого целевого биологического возраста, простым электрическим переключением производится включение режима температурного градиента, и личинки *G. mellonella* сами под действием температурного градиента перемещаются в зону сбора. За счет этого снижается трудоемкость их выращивания и себестоимость продукции за счет сокращения ручного труда и повышения степени автоматизации технологического процесса.

Расчет экономической эффективности работы устройства

Кормление личинок большой восковой моли в соответствии с рекомендациями, при соблюдении остальной технологии содержания, способствует получению качественных здоровых насекомых, а также стабильному увеличению биомассы. Рынок сбыта личинок насекомых, выращенных в лабораторных условиях, имеет несколько направлений применения.

В качестве прототипа рассматривали «Молярий», рассчитанный на такой же объем, что и ЭУ. Расчет экономической эффективности работы устройства включает ряд основных показателей, представленных в таблице 5.

Таблица 5. Сравнительная оценка технико-экономической эффективности экспериментального устройства и прототипа на 1 год производства биосырья *G. mellonella*

Показатели	Размерность	Обозначение	Прототип	ЭУ
Количество устройств, необходимых на 10 м ³	шт.	N	64	64
Цена одной опытной установки (ОУ)	руб.	Ц _{оу}	7 000	5 000
Объем производимой продукции	кг/64 устройства	A	448	921,6
Мощность одного устройства	кВт	P _л	0,03	0,165
Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии	руб./кВт·ч	СкВт	3,24	3,24
Коэффициент, учитывающий расходы на монтаж		Км	0,2	0,2
Коэффициент, учитывающий транспортные расходы		Кт	0,12	0,12
Срок службы обогревающих устройств	час	Тл	35 040	438 000
Время работы ОУ в году	час	Траб	352	352
Зарплата обслуживающего персонала	руб.	ЗП	12 000	6 000
Нормативный коэффициент эффективности капиталовложений		Ен	0,15	0,15
Цена продукции	руб.	Цд	10 000	10 000

Данные расчета эффективности разработанного устройства, представлены в таблице 6.

Таблица 6. Данные расчета экономической эффективности

Показатель	Размерность	Обозначение	Вариант	
			Прототип	ЭУ
Капитальные вложения	руб.	K	422 400	591 360
Эксплуатационные затраты	руб.	ЭЗ	743140,83	655176,752
Стоимость потребленной электроэнергии	руб.	С _э	63063,98	34685,1
Амортизационные отчисления	руб.	С _а	5332,608	322,304
- на 1 устройство	руб.	С _{ал}	83,322	5,036
Затраты на ЗП	руб.	С _{зп}	144 000	72 000
Затраты на текущий ремонт	руб.	С _{тр}	52 800	73 920
Прочие затраты	руб.	С _{пр}	5885,80	35893,43
Приведенные затраты	руб.	ПЗ	718536,75	491492,83
Приведенные затраты на единицу продукции	руб./1 кг	ПЗ _{пр}	1603,87	533,3
Годовой экономический эффект	руб.	Г _{ээ}		801515,52
Срок окупаемости	год	T		0,7

Годовой экономический эффект, руб.

$$Г_{ээ} = \left(\frac{ПЗ_{баз}}{A_1} - \frac{ПЗ_{проект}}{A_2} \right) \cdot A_2. \quad (6)$$

$$Г_{ээ} = ((718536,752(512 = 16 \text{ циклов} \cdot 0,5 \text{ кг} \cdot 64 \text{ устройства})) - (491492,83/921,6 (16 \text{ циклов} \cdot 0,9 \text{ кг} \cdot 64 \text{ устройства}))) \cdot 921,6 = 533,3 \cdot 921,6 = 801515,52.$$

Таким образом, окупаемость экспериментальной установки = 591360/801515,52 = 0,7.

Поскольку в экспериментальной установке сортировка личинок полуавтоматическая, то, как следует из расчетов, происходит снижение затрат на заработную плату, что в итоге снижает себестоимость полученного биосырья в 2,6 раза, что в конечном

итоге отражается на показателе рентабельности. Кроме того, за счет более легкой сортировки личинок на выходе получаем на 45% больше биосырья, чем в прототипе, что также отражается на рентабельности установки. Высокая экономическая эффективность экспериментальной установки отразилась на быстрой окупаемости. Технико-экономические преимущества предложенного устройства заключаются в повышении производительности установки за счет непрерывности процесса, происходящего в биореакторе.

Таким образом, технологический процесс культивирования и сортировки основывается на температурном градиенте, благодаря которому цикл развития личинок *G. mellonella* контролируется и регулируется в зависимости от необходимых требований. На этапе культивирования температура для поддержания процессов жизнедеятельности составляет 40°C при относительной влажности 70%. На этапе сортировки температурный градиент повышается до 55°C, что заставляет ЛБВМ активно перемещаться в нужную сторону. Данная технология является универсальной для любых видов насекомых, может применяться и в других отраслях науки и практики с целью повышения эффективности использования.

Выводы

Проведенный анализ технологий и оборудования позволил установить целесообразность использования конвективного теплообмена для культивирования и сортировки личинок *G. mellonella*.

Полученные результаты морфофизиологических показателей личинок *G. mellonella* позволяют сделать вывод об оптимальных условиях выращивания:

- продолжительность развития – 24 сут.;
- масса полученных личинок – 0,17 мг;
- длина – 1,92 мм;
- головная капсула соответствует VII возрасту.

Экспериментально доказано, что разработанная модель позволяет создать оптимальные режимы нагрева:

- на 1-м этапе культивирования нагрев производится до 40°C при экспозиции 8 дней;
- на 2-м этапе сортировки – до 55°C при экспозиции 20 минут;
- нагрев от процесса культивирования до процесса сортировки от 40 до 55°C занимает 60 мин. За это время 100% личинок переходят в контейнер.

Разработанная экспериментальная установка имеет более высокую экономическую эффективность по сравнению с прототипом, что позволит в короткие сроки получить качественный продукт.

Список источников

1. Биореактор для культивирования и сортировки личинок большой восковой моли (*Galleria mellonella* L.): пат. на полезную модель 203173 Рос. Федерация. № 2020129966; заявл. 10.09.2020; опубл. 24.03.2021, Бюл. № 9. 7 с.
2. Молярый: пат. на полезную модель 164529 Рос. Федерация. № 2015146055/13; заявл. 26.10.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. 6 с.
3. Осокина А.С., Колбина Л.М., Гушин А.В. Математическое планирование эксперимента в изучении привлекательности питательной среды для личинок *Galleria mellonella* // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2017. № 4. С. 57–65.
4. Способ воспроизводства капустной совки: пат. 2149542 Рос. Федерация. № 98110198/13; заявл. 29.05.1998; опубл. 27.05.2000, Бюл. № 15. 11 с.
5. Установка для выращивания насекомых: пат. 2033047 Рос. Федерация. № 4933355/15; заявл. 28.02.1991; опубл. 20.04.1995, Бюл. № 24. 7 с.
6. Устройство для разделения гусениц большой восковой моли по возрастам: авторское свидетельство на изобретение СССР 1165333. № 3453344/30-15; заявл. 16.06.1982; опубл. 07.07.1985, Бюл. № 25. 3 с.
7. Cardoso A.C., Prata M.C., Furlong J., Prezoto F. Exigências Térmicas de Estágios Imaturos de *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Pyralidae) // Neotropical Entomology. 2007. Vol. 36(5). P. 657–661. DOI:10.1590/S1519-566X2007000500004.

8. Dyar H.G. The number of molts of Lepidopterous Larvae // *Psyche. A Journal of Entomology*. 1890. Vol. 5. Article ID 023871. <https://doi.org/10.1155/1890/23871>.
9. Eischen F.A., Dietz A. Improved culture techniques for mass rearing *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) // *Entomological News (USA)*. 1990. Vol. 101(2). P. 123–128.
10. Ellis J.D., Graham J.R., Mortensen A. Standard methods for wax moth research // *Journal of Apicultural Research*. 2013. Vol. 52(1). P. 1–17. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.10>.
11. Hanumantha Swamy B.S. Bionomics and biometrics of Greater wax moth *Galleria mellonella* Linnaeus // *Asian Journal of Bioscience*. 2008. Vol. 3(1). P. 49–51.

References

1. Биореактор для культивирования и сортировки личинок большой восковой моли (*Galleria mellonella* L.) [Bioreactor for cultivation and sorting of Larvae of Greater wax moth (*Galleria mellonella* L.)]: патент на полезную модель 203173 Рос. Федерация. № 2020129966; заявлено 10.09.2020; опубликовано 24.03.2021, Byul. № 9 = Utility Model Patent 2031731 Russian Federation. No. 2020129966; claimed 10.09.2020; published 24.03.2021, Bulletin 9. 7 p. (In Russ.).
2. Мольарий [Molar]: патент на полезную модель 164529 Рос. Федерация. № 2015146055/13; заявлено 26.10.2015; опубликовано 10.09.2016, Byul. № 25 = Utility Model Patent 164529 Russian Federation. No. 2015146055/13; claimed 26.10.2015; published 10.09.2016, Bulletin 25. 6 p. (In Russ.).
3. Осокина А.С., Колбина Л.М., Гущин А.В. Математическое планирование эксперимента в изучении привлекательности питательной среды для личинок *Galleria mellonella* [Mathematical planning of an experiment in studying the environment for *Galleria mellonella* larvae]. *Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet) = Vestnik NGAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2017;(4):57-65. (In Russ.).
4. Способ воспроизводства капустной совки [Method of Cabbage moth reproduction]: патент 2149542 Рос. Федерация. № 98110198/13; заявлено 29.05.1998; опубликовано 27.05.2000, Byul. № 15 = Patent 2149542 Russian Federation. No. 98110198/133; claimed 29.05.1998; published 27.05.2000, Bulletin 15. 11 p. (In Russ.).
5. Установа для выращивания насекомых [Installation for growing insects]: патент 2033047 Рос. Федерация. № 4933355/15; заявлено 28.02.1991; опубликовано 20.04.1995, Byul. № 24 = Patent 2033047 Russian Federation. No. 4933355/15; claimed 28.02.1991; published 20.04.1995, Bulletin 24. 7 p. (In Russ.).
6. Устройство для разделения гусениц большой восковой моли по возрастам [A device for separating the caterpillars of Greater wax moth by age]: авторское свидетельство на изобретение СССР 1165333. № 3453344/30-15; заявлено 16.06.1982; опубликовано 07.07.1985, Byul. № 25 = Inventor's certificate 1165333, USSR. No. 3453344/30-15; claimed 16.06.1982; published 07.07.1985, Bulletin 25. 3 p. (In Russ.).
7. Cardoso A.C., Prata M.C., Furlong J., Prezoto F. Exigências Térmicas de Estágios Imaturos de *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Pyralidae). *Neotropical Entomology*. 2007;6(5):657–661. DOI:10.1590/S1519-566X2007000500004.
8. Dyar H.G. The number of molts of Lepidopterous Larvae. *Psyche. A Journal of Entomology*. 1890;(5): ID 023871. <https://doi.org/10.1155/1890/23871>.
9. Eischen F.A., Dietz A. Improved culture techniques for mass rearing *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Entomological News (USA)*. 1990;101(2):123-128.
10. Ellis J.D., Graham J.R., Mortensen A. Standard methods for wax moth research. *Journal of Apicultural Research*. 2013;52(1):1-17. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.10>.
11. Hanumantha Swamy B.S. Bionomics and biometrics of Greater wax moth *Galleria mellonella* Linnaeus. *Asian Journal of Bioscience*. 2008;3(1):49-51.

Информация об авторах

В.В. Соколов – аспирант кафедры пищевой инженерии и биотехносферной безопасности ФГБОУ ВО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, vladislav-sokolov-92@mail.ru.

А.С. Осокина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», anastasia.osokina2017@yandex.ru.

В.В. Касаткин – доктор технических наук, профессор кафедры пищевой инженерии и биотехносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия», kasww@mail.ru.

Information about the authors

V.V. Sokolov, Postgraduate Student, the Dept. of Food Engineering and Biotechnosphere Safety, Izhevsk State Agricultural Academy, vladislav-sokolov-92@mail.ru.

A.S. Osokina, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, anastasia.osokina2017@yandex.ru.

V.V. Kasatkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Food Engineering and Biotechnosphere Safety Izhevsk State Agricultural Academy, kasww@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.10.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 20.11.2021.

The article was submitted 02.10.2021; approved after revision 10.11.2021; accepted for publication 20.11.2021.

© Соколов В.В., Осокина А.С., Касаткин В.В., 2021