

УДК 697.9:636.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СИСТЕМ МИКРОКЛИМАТА ПТИЧНИКА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ангелюк И.П., Федюшко Ю.М., Топорен С.С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
E-mail: iliya.angeluck@yandex.ru; fedushko26@rambler.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача повышения энергоэффективности и продуктивности в современном птицеводстве за счет применения методов компьютерного моделирования. Высокая стоимость энергоресурсов и ужесточение экологических норм обуславливают необходимость оптимизации систем обеспечения микроклимата в птицеводческих помещениях. Традиционные эмпирические методы управления не позволяют в полной мере учесть динамическое взаимодействие множества факторов: тепловыделения птицы, влажности, концентрации вредных газов, работы вентиляционного и отопительного оборудования, а также изменчивость внешних погодных условий. В данной работе представлен подход к созданию динамической энергетической модели микроклимата птичника. Модель строится на основе системной динамики и дискретно-событийного подхода, что позволяет интегрировать физические принципы тепло- и массообмена с алгоритмами работы технологического оборудования. В статье описана структура модели, ключевые математические зависимости, определяющие тепловой баланс помещения, а также программная реализация.

Предмет исследования: процессы формирования микроклимата и энергопотребления в птичнике для выращивания бройлеров.

Материалы и методы: Проведено компьютерное имитационное динамическое моделирование тепловлажностного режима птичника в программном комплексе DesignBuilder с использованием расчетного ядра EnergyPlus.

В рамках исследования была разработана детализированная трехмерная геометрическая модель здания с полным описанием теплофизических характеристик ограждающих конструкций и заданы динамические профили внутренних нагрузок, коррелирующие с производственным циклом выращивания птицы.

Результаты: Динамическое моделирование позволило количественно оценить влияние каждого мероприятия на энергопотребление. Установлено, что улучшение теплозащиты ограждающих конструкций позволяет снизить годовые Наибольший эффект продемонстрировал комплексный подход, объединяющий все мероприятия, который позволил достичь сокращения энергопотребления по сравнению с базовым вариантом.

Выводы: Проведенное исследование доказывает высокую эффективность применения динамического энергетического моделирования на этапе предпроектного анализа для оптимизации проектных решений. Разработанный комплекс мероприятий является технически и экономически целесообразным, обеспечивая снижение энергопотребления почти вдвое при сроке окупаемости дополнительных инвестиций около 4 лет. Полученные результаты имеют существенное значение для повышения энергоэффективности и конкурентоспособности птицеводческих предприятий.

Ключевые слова: энергоэффективность, птичник, микроклимат, DesignBuilder, EnergyPlus, BIM-моделирование, динамический тепловой расчет, ограждающие конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Растущая напряженность в мировой энергетической сфере, усугубляемая экологическими императивами по снижению антропогенной нагрузки на биосферу, актуализирует разработку и внедрение ресурсосберегающих технологий в системах энергообеспечения производственных объектов.

В данном контексте особую актуальность приобретает проблема оптимизации энергопотребления агропромышленными комплексами, в частности, птицеводческими предприятиями, характеризующимися значительной энергоемкостью технологических процессов, обусловленной необходимостью поддержания строго регламентированных параметров микроклимата.

Современное сельскохозяйственное производство, в частности птицеводство, характеризуется высокой концентрацией поголовья

и интенсивностью технологических процессов. Это предъявляет повышенные требования к капитальным строениям – птичникам, которые должны быть не только прочными и долговечными, но и обеспечивать стабильный микроклимат при минимальных энергозатратах. В структуре себестоимости продукции до 60% составляют расходы на корма и энергоносители, причем на поддержание параметров микроклимата может приходиться от 30 до 50% всего энергопотребления предприятия [1, 13].

Сложность проектирования таких объектов заключается в необходимости учета уникального сочетания факторов: высоких и переменных во времени внутренних тепловыделений, необходимости интенсивного воздухообмена для удаления вредных газов, повышенных требований к герметичности и теплозащите для исключения конденсата и сквозняков.

Традиционные методы проектирования, основанные на выполнении нормативных

требований к сопротивлению теплопередаче [2,15] и упрощенных расчетах теплового баланса, не позволяют оценить синергетический эффект от взаимодействия всех элементов здания как единой системы. Это часто приводит к перерасходу энергии, неоптимальным капитальным вложениям и проблемам с микроклиматом на этапе эксплуатации.

Микроклимат птичника представляет собой сложную многокомпонентную динамическую систему, находящуюся под постоянным воздействием внешних и внутренних возмущающих факторов. К внутренним источникам тепла и влаги относится сама птица, метаболизм которой существенно изменяется в зависимости от возраста, живой массы и вида. Внешние факторы - это температура и влажность наружного воздуха, скорость ветра, солнечная радиация.

Задача системы управления заключается в стабилизации внутренних параметров (температуры, влажности, концентрации CO₂ и аммиака) в узком зоотехническом диапазоне путем активации соответствующего оборудования: вентиляторов, нагревателей, испарительных охладителей, штор [3,14].

Применение классических систем автоматического регулирования, основанных на ПИД - регуляторах и простых релейных логиках, часто приводит к неоптимальному энергопотреблению из-за запаздываний, перерегулирования и неучета совокупности всех факторов. Современным инструментом для анализа, синтеза и оптимизации таких сложных систем является компьютерное имитационное моделирование

Интегрированное проектирование, объединяющее архитектурно-строительные и инженерные решения в единой цифровой модели (BIM/BEM), становится отраслевым стандартом. Использование специализированного программного обеспечения, такого как DesignBuilder с расчетным ядром EnergyPlus, позволяет перейти от статических к динамическим расчетам, учитывающим:

- нестационарный характер теплопередачи через ограждающие конструкции;
- суточные и годовые колебания наружной температуры и солнечной радиации;
- режимы работы инженерных систем (вентиляции, отопления) и их влияние на температурные поля;
- влажностный режим конструкций и риск выпадения конденсата.

Целью данного исследования является разработка на основе динамического моделирования комплекса строительно-технологических решений для энергоэффективных птичников, обеспечивающих снижение эксплуатационных затрат и повышение рентабельности производства.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенный обзор современных научных публикаций, посвященных проблемам энергосбережения и энергообеспечения в агропромышленном комплексе, позволяет выявить ключевые тенденции, основные направления исследований в данной области. Большой пласт публикаций посвящен совершенствованию ограждающих конструкций птичников.

Актуальность проблемы создания оптимального микроклимата и совершенствованию ограждающих конструкций в типовых птицеводческих помещениях с учетом зональных особенностей упоминается в работах [3 - 8].

В ходе исследования, проведенного Э. Маилян [3], проанализирована динамика изменения качественных показателей воздушной среды в птичниках напольного содержания в зимний и переходный периоды. Автор подчёркивается ключевое влияние различных систем вентиляции на физиологическое состояние и продуктивность птицы.

В своей работе Бахарев А. П. [4] проводит сравнительный анализ различных систем вентиляции. Наиболее перспективными признаются системы, создающие отрицательное давление внутри помещения с использованием крышных вентиляторов.

Авторы [5] анализируют работу различных систем вентиляции в экстремальных климатических условиях Якутии, отмечая высокую энергоёмкость и технологические трудности поддержания нормативных параметров микроклимата. Установлено, что при падении температуры наружного воздуха ниже -45°С обеспечение требуемых условий становится практически невыполнимой задачей.

Исследования Мотес Э. [6], Закипной Е. В. [7- Красноярск] демонстрируют, что применение современных многослойных сэндвич-панелей с утеплителем из минеральной ваты толщиной 200-250 мм позволяет снизить теплопотери через ограждающие конструкции на 25-30% по сравнению с традиционными материалами.

При этом авторы подчеркивают важность качества монтажа для минимизации мостиков холода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования выступил типовой проект птичника для выращивания бройлеров вместимостью 40 000 голов. Моделирование выполнялось в программном комплексе DesignBuilder, который предоставляет инструменты для создания геометрии, задания свойств материалов, определения нагрузок и проведения динамических расчетов.

Основу энергетической модели составляет уравнение теплового баланса воздушной среды птичника [8]:

$$V \cdot \rho \cdot c_p \frac{T_{вн}}{dt} = Q_{нт} + Q_{обор} - Q_{вент} - Q_{огр} - Q_{исп} \quad (1)$$

где V – объем помещения, м³;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 c_p – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг °С);
 T_{вн} – температура внутреннего воздуха, °С;
 t – время, с;
 Q_{нт} – общее тепловыделение поголовья, Вт;
 Q_{обор} – тепловыделение от осветительных приборов и механизмов, Вт;
 Q_{вент} – теплопотери с вентиляционным воздухом, Вт;
 Q_{огр} – теплопотери через ограждающие конструкции, Вт.

$$Q_{вент} = L \cdot \rho \cdot c_p (T_{вн} - T_{нар}) \quad (2)$$

где L - производительность системы вентиляции, м³/с;
 ρ - плотность воздуха, кг/м³;
 T_{нар} - температура наружного воздуха, °С.

Система управления должна найти такое значение производительности вентиляции, L, чтобы удалить лишнюю влагу, вредные газы и поддержать температуру на заданном уровне.

Теплопотери через ограждающие конструкции рассчитываются по стандартной методике с учетом термического сопротивления материалов.

Тепловыделение птицы, Q_{пт}, рассчитывается как функция от вида, возраста и живой массы, по методике, приведенной в Влаговыделения рассчитываются аналогичным образом.

Модель реализована в виде гибридной структуры [9]:

- системная динамика представлена запасами (уровнями) – «Температура внутреннего воздуха», «Влажность внутреннего воздуха», «Концентрация СО₂». Поток между запасами регулируется уравнениями, приведенными выше;

- дискретно - событийная компонента моделирует работу технологического оборудования (включение/выключение вентиляторов разных ступеней, нагревателей, штор) по событиям (например, по расписанию, либо по достижению порогового значения температуры);

- локальная компонента может быть использована для моделирования отдельных зон помещения или групп птицы с разными параметрами.

В модель интегрированы суточные и годовые профили наружной температуры и влажности, основанные на реальных метеоданных региона.

Моделирование каждого сценария проводилось на виртуальном периоде 30 суток.

В рамках данного исследования, в программной среде DesignBuilder была создана модель базового варианта, который соответствует нормативам, и варианта с предложенными мерами по энергосбережению [10]. Создана трехмерная модель здания с точным соблюдением геометрических размеров, ориентации по сторонам света и архитектурных особенностей (рис. 1).

После построения трехмерной модели здания, размещение всех светопрозрачных конструкций и дверей, здание было разделено на 2 зоны, теплофизические параметры внутри которых частично отличаются.

Для здания заданы различные параметры, которые описывают режим функционирования объекта, основные параметры микроклимата, количество людей на единицу площади, температуру отопления, а для всех конструкций (стены, кровля, пол, ворота) заданы послойно состав и теплофизические характеристики материалов (толщина, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость) в соответствии с проектом.

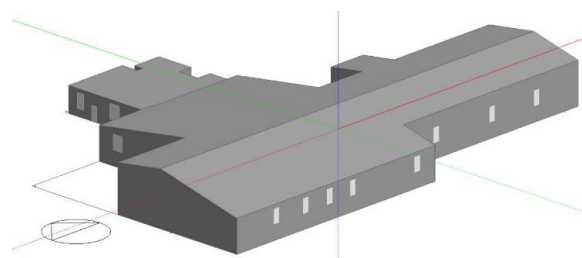


Рис. 1. 3D - модель птичника в среде DesignBuilder
 Fig. 1. 3D model of a poultry house in the DesignBuilder environment

Тепловыделения и влаговыделения от поголовья заданы как динамические зависимости, изменяющиеся каждые 2-3 дня в соответствии с зоотехническими нормативами [11,12].

Для каждого из рассматриваемых вариантов выполнялся почасовой динамический расчет на весь год с помощью приложения EnergyPlus.

Для данного объекта задавались следующие ОК: External walls (внешние стены), Flat roof (совмещенное покрытие), Internal floor (внутренний пол), Ground floor (пол по грунту), External Door (наружная дверь).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Просимулировав построенную модель здания были получены результаты моделирования, которые наглядно демонстрируют влияние строительных решений на энергопотребление (табл.1, рис. 2).

Таблица 1. Влияние строительных решений на энергопотребление
Table 1. The impact of construction decisions on energy consumption

| № п/п | Вариант | Годовое энергопотребление на отопление, кВт·ч | Снижение к базовому варианту, % | Расчетные приведенные затраты за 10 лет, тыс. руб. |
|-------|-------------------|---|---------------------------------|--|
| 1. | Базовый | 522 750 | - | 6285 |
| 2. | Теплая оболочка | 398 100 | 23,8 | 5845 |
| 3. | Герметичный объем | 362 500 | 30,6 | 5720 |
| 4. | Рекуперация | 341 200 | 34,7 | 5910 |
| 5. | Комплексный | 265 800 | 42,9 | 5550 |

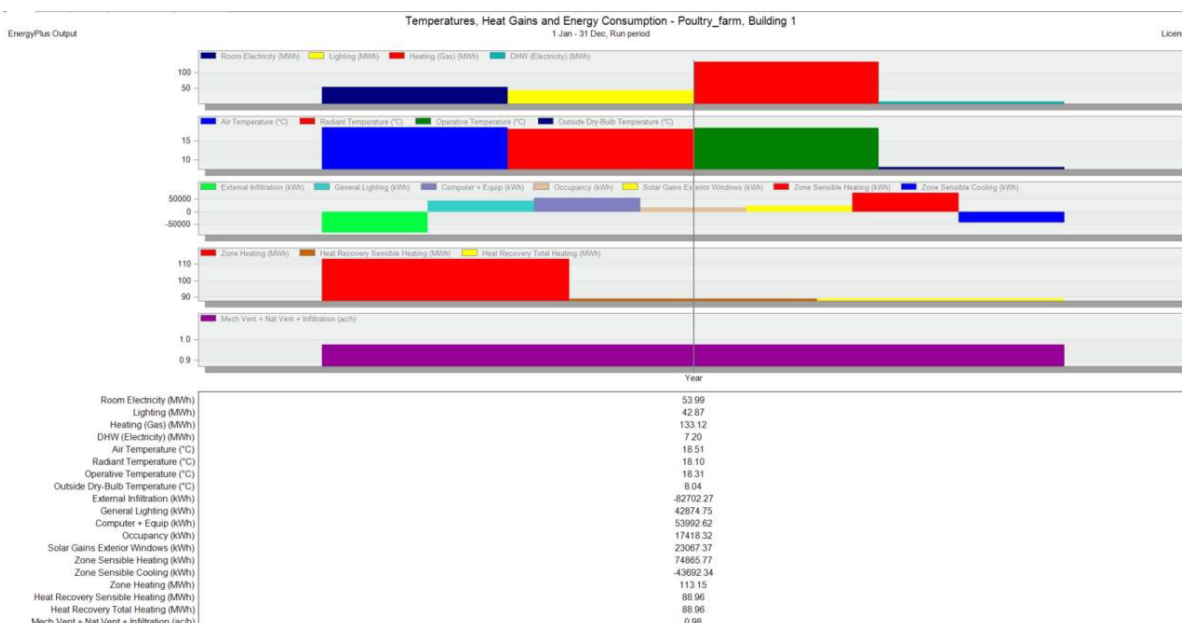


Рис. 1. Результаты моделирования модели здания
Fig. 1. Building model modeling results

Со скриншота видно, что расход электроэнергии на отопление составляет 273,8 МВт·ч, расход на освещение и приборы составляет 96,86 кВт·ч.

Значение электрической энергии в модели отличается от реальных затрат, поскольку в потребление еще включено насосное оборудование, которое находится в отдельном помещении.

Потребление тепловой энергии уменьшилось более чем на 100 МВт·ч. Следовательно, можем считать эти меры достаточно перспективными и целесообразными для внедрения.

Наибольшее влияние на снижение энергопотребления вносит улучшение теплозащиты ("Теплая оболочка" – 23,8%).

Повышение герметичности дает дополнительную экономию почти в 7%, что сопоставимо с эффектом от установки рекуператора в базовом здании.

Комплексный подход демонстрирует не просто сумму отдельных эффектов, а синергию. Экономия в 49.2% достигнута за счет того, что в хорошо утепленном и герметичном здании

рекуперационная установка работает в более эффективном режиме, утилизируя тепло из более плотного и теплого внутреннего воздуха.

Моделирование показало, что в базовом варианте в холодный период температура на внутренней поверхности стены в зоне угла может опускаться до 12,5°C при температуре воздуха 20°C. Это приводит к выпадению конденсата, развитию плесени и разрушению конструкции. В сценарии "Теплая оболочка" эта температура составляет уже 17,8°C, что исключает конденсацию. Это критически важно для здоровья птицы и долговечности здания.

Несмотря на то, что капитальные затраты на "Комплексный" вариант на 15-20% выше, чем на базовый, расчет приведенных затрат за 10-летний период показывает его экономическую целесообразность.

Срок окупаемости дополнительных инвестиций составляет около 4 лет за счет резкого снижения затрат на энергоносители.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показывает, что современное проектирование сельскохозяйственных зданий невозможно без применения динамического энергетического моделирования. Программный комплекс является инструментом, позволяющим не только оценивать энергоэффективность, но и оптимизировать строительные решения на этапе предпроектной проработки.

Разработанная динамическая энергетическая модель микроклимата птичника показала свою адекватность и практическую полезность. Модель позволяет количественно оценивать эффективность различных инженерных и управленческих решений до их внедрения в реальное производство, минимизируя риски и капитальные затраты.

Разработанный комплекс мероприятий по повышению теплозащиты, герметичности и утилизации тепла позволяет сократить энергопотребление птичника почти вдвое. Это имеет не только экономический, но и значительный экологический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валов В.М. Энергосберегающие животноводческие здания: науч. изд. / В.М.Валов. - М.: Изд-во АСВ, 1997. - 310 с.
2. СП 50.13330.2012 "Тепловая защита зданий". Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. - М., 2012.
3. Маилян Э. Микроклимат в бройлерном птицеводстве при напольном содержании / Э. Маилян // АгроРынок. - 2007. - №4. - С. 12-14.
4. Бахарев, А.П. Вентиляция птичников по уровню CO₂ при выращивании цыплят-бройлеров // Зоотехния / А.П. Бахарев. - 2014. - № 10. - С 23-25.
5. Саввинова М. С. Оптимизация микроклимата птичников в условиях Крайнего Севера // Вестник КрасГАУ / М. С. Саввинова, В. В. Матаркина. - Красноярск: КрасГАУ, 2019. - №11. - С. 84 - 89.
6. Мотес Э. Микроклимат животноводческих помещений / Э. Мотес; Пер. с нем. В.Н. Вазонова. - М.: Колос, 1976. - 192 с.
7. Закипная Е.В. Влияние воздушной среды на продуктивные качества и физиологическое состояние цыплят-бройлеров в условиях Приамурья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Е.В. Закипная. Уфа, 2005. 22 с.
8. Мурусидзе Д.Н. Установки для создания микроклимата на животноводческих фермах // Д.Н. Мурусидзе, А.Б. Левин. - М.: Агропромиздат, 1992. - 222 с.
9. Кириллов Е.Н. Моделирование процессов теплоснабжения зданий для прогнозирования температуры воздуха в помещениях Дис.к.т. наук / Е.Н. Кириллов, Международный институт компьютерных технологий - Воронеж - 2007.

10. Кувшинов Ю.Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. - М.: Из-во Ассоциации строительных вузов, 2010. - 320 с.

11. Вишневецкий Е. П. Сравнительный анализ систем адиабатического увлажнения воздуха. / Е.П. Вишневецкий // Кондиционирование. №8, 2004. с.46-48

12. Кочиш И.И. Выбор системы вентиляции для птицеводческих ферм / Кочиш И.И., Чекмарев А.Д. // Зоотехния. - 2004. - № 4. - С. 23-26.

13. Лохвинская Т.И. Методы и средства организации воздухообмена в птицеводческих помещениях/Т.И. Лохвинская//Lucrări științifice, UASM. Chișinău, 2015, vol 45 (InginerieAgrară șitransportAuto), p. 136-138.

14. Свистунов В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства. учебник для вузов / В.М. Свистунов. -СПб.: Политехника, 2010. - 4-е изд. - 428 с.

15. Дацюк Т.А. Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий / Т. А. Дацюк, В. Ф. Васильев, В.В. Дерюгин, Ю.П. Ивлев // Санитарная техника . - 2005. - № 3(4). - С. 57-62.

REFERENCES

1. Valov V.M. Energy-saving livestock buildings: scientific ed. / V.M.Valov. - M.: Publishing house of the DIA, 1997. - 310 p.
2. SP 50.13330.2012 "Thermal protection of buildings". Updated edition of SNiP 23-02-2003. Moscow, 2012.
3. Mailyan E. Microclimate in broiler poultry farming with outdoor maintenance / E. Mailyan // Agro Market. - 2007. - No. 4. - pp. 12-14.
4. Bakharev, A.P. Ventilation of poultry houses by CO₂ level when raising broiler chickens //Animal science / A.P. Bakharev. - 2014. - No. 10. - From 23-25.
5. Savvinova M. S. Optimization of the microclimate of poultry houses in the conditions of the Far North // Bulletin of the KrasGAU / M. S. Savvinova, V. V. Matarkina. - Krasnoyarsk: KrasGAU, 2019. - No. o 11. - pp. 84-89.
6. Motes E. Microclimate of livestock premises / E. Motes; Translated from German by V.N. Vazonov. - M.: Kolos, 1976. - 192 p.
7. Zakipnaya E.V. The influence of the air environment on the productive qualities and physiological state of broiler chickens in the Amur region: abstract of the dissertation. ... Candidate of Agricultural Sciences / E.V. Zakipnaya. Ufa, 2005. 22 p.
8. Murusidze D.N. Installations for creating a microclimate on livestock farms // D.N. Murusidze, A.B. Levin. - M.: Agropromizdat, 1992. - 222 p.

9. Kirillov E.N. Modeling of building heat supply processes for predicting indoor air temperature / E.N. Kirillov, International Institute of Computer Technology - Voronezh – 2007.

10. Kuvshinov Yu.Ya. Energy saving in the building microclimate system. Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2010. 320 p.

11. Vishnevsky E. P. Comparative analysis of adiabatic humidification systems. / E.P. Vishnevsky // Air conditioning. No. 8, 2004. pp.46-48

12. Kochish I.I. The choice of ventilation system for poultry farms / Kochish I.I., Chekmarev A.D. // Animal science. - 2004. - No. 4. - pp. 23-26.

13. Lokhvinskaya T.I. Methods and means of organizing air exchange in poultry facilities/T.I. Lokhvinskaya//Lucrări științifice, UASM. Chișinău, 2015, vol 45 (Inginerie Agrară și transportAuto), p. 136-138.

14. Svistunov V.M. Heating, ventilation and air conditioning of facilities of the agro-industrial complex and housing and communal services. textbook for universities / V.M. Svistunov. -St. Petersburg: Polytechnic, 2010. - 4th ed. - 428 p.

15 Datsyuk T.A., Vasilyev V. F., Deryugin V.V., Ivlev Yu.P. A new technology for designing building microclimate systems // Sanitary engineering. – 2005. – № 3(4). – Pp. 57-62.

OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION OF POULTRY HOUSE MICROCLIMATE SYSTEMS BASED ON DYNAMIC ENERGY MODELING

Angeluck I.P., Fedyushko Yu.M., Toporen S.S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050
E-mail: iliya.angeluck@yandex.ru; fedushko26@rambler.ru

Abstract. The article considers the urgent task of increasing energy efficiency and productivity in modern poultry farming through the use of computer modeling methods. The high cost of energy resources and stricter environmental regulations necessitate the optimization of microclimate systems in poultry farms. Traditional empirical management methods do not allow us to fully take into account the dynamic interaction of many factors: poultry heat release, humidity, concentration of harmful gases, operation of ventilation and heating equipment, as well as the variability of external weather conditions. This paper presents an approach to creating a dynamic energy model of the microclimate of a poultry house. The model is based on system dynamics and a discrete event approach, which makes it possible to integrate the physical principles of heat and mass transfer with the algorithms of technological equipment. The article describes the structure of the model, the key mathematical dependencies that determine the thermal balance of the room, as well as the software implementation.

Subject of the study: the processes of microclimate formation and energy consumption in a poultry house for broiler farming.

Materials and methods: A computer simulation dynamic simulation of the heat and humidity regime of the poultry house was carried out in the DesignBuilder software package using the EnergyPlus calculation core.

As part of the study, a detailed three-dimensional geometric model of the building was developed with a complete description of the thermophysical characteristics of the enclosing structures and dynamic profiles of internal loads were set that correlate with the production cycle of poultry farming.

Results: Dynamic modeling made it possible to quantify the impact of each event on energy consumption. It has been established that improving the thermal protection of enclosing structures can reduce annual costs. The greatest effect was demonstrated by an integrated approach combining all measures, which made it possible to achieve a reduction in energy consumption compared to the basic option.

Conclusions: The conducted research proves the high efficiency of using dynamic energy modeling at the stage of pre-design analysis to optimize design solutions. The developed package of measures is technically and economically feasible, ensuring a reduction in energy consumption by almost half with a payback period of additional investments of about 4 years. The results obtained are essential for improving the energy efficiency and competitiveness of poultry enterprises.

Key words: energy efficiency, poultry house, microclimate, DesignBuilder, EnergyPlus, BIM modeling, dynamic thermal calculation, enclosing structures.