

## Методологический аспект проблемы развития резервных энергосберегающих систем вентиляции

Ротова В.А., Асманкин Е.М., (✉) Ушаков Ю.А., Нейфельд Е.В., Иванов П.А., Резанов А.И.

*Оренбургский государственный аграрный университет*

Оренбург, Россия

(✉) e-mail: 1u6j1a159@mail.ru

В статье рассмотрены специфика создания и основные предпосылки к внедрению резервных вентиляционных систем для типовых крупногабаритных птицеводческих цехов. Современное оборудование, используемое для обеспечения надлежащих микроклиматических условий в птицеводческих цехах, включая комбинированные вентиляционные системы тоннельного типа, полностью зависимо от электричества. В случае любой аварийной ситуации, связанной с электроснабжением, от удушья и перегрева погибает практически все поголовье. Особенно опасны летние высокотемпературные периоды, поскольку при остановке основной системы вентиляции воздухообмен с окружающей средой полностью прекращается в силу равенства значений температур внутри помещения и за его пределами. В публикации предлагается альтернативное решение: перемещение воздушной массы на основе принципа ее конвекционирования. Логика изложения материала делает возможным понимание как актуальности экономического аспекта прогнозируемого риска аварий и утраты рентабельности, так и достоверности проектирования функциональной структуры с созданием принципиальной схемы технического решения, исключающего подобные риски. Механизм создания векторных потоков, влияющих на формирование и релокацию температурных полей, а также на кратность воздухообмена внутри крупногабаритных технологических помещений, приводится не только в виде принципиальной схемы на основе ледогенераторов, но и как методологический алгоритм, положенный в план вычислительного эксперимента, целью которого является оценка функциональности и технологичности апробируемого проекта. Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что при значительном расходе энергии не исключается возможность ее перераспределения для обеспечения работы системы охладительного контура с ледогенераторами. За счет «сэкономленной» электроэнергии резервная вентиляционная система, находясь в режиме «холодного» ожидания, потенциально готова запустить процесс конвекционного вентилирования птицеводческого цеха при отключении его от электросети на период проведения ремонтно-восстановительных работ.

**Ключевые слова:** птицеводческий цех, естественная вентиляция, охлаждающая установка, теплообмен

## Methodological aspect of the problem of development of backup energy-saving ventilation systems

Rotova V.A., Asmankin E.M., (✉) Ushakov Yu.A., Neifeld E.V., Ivanov P.A., Rezanov A.I.

*Orenburg State Agrarian University*

Orenburg, Russia

(✉) e-mail: 1u6j1a159@mail.ru

This publication examines the main prerequisites for the implementation and specifics of creating backup ventilation systems for typical large-scale poultry farms. The modern equipment used to provide microclimatic conditions, including combined tunnel-type ventilation systems, are completely dependent on electricity. In the event of any emergency related to the power supply of the poultry complex, almost the entire population of the serviced birds dies from suffocation and overheating. Summer high-temperature periods are especially dangerous, since when the main ventilation system stops, air exchange with the environment completely stops due to the equality of the temperatures inside and outside the premises. The publication proposes to consider an alternative: the movement of the air mass based on the principle of its convection. The logic of the presentation of the material in the publication makes it possible to understand both the relevance of the economic aspect of the predicted

risk of accidents and loss of profitability, and the reliability of the design of the functional structure with the creation of a basic diagram of the technical solution that eliminates such risks. The mechanism for creating vector flows that affect the formation and relocation of temperature fields, as well as the multiplicity of the air exchange inside large-sized technological premises, is presented not only in the form of a schematic diagram based on ice generators, but also formalized into a methodological algorithm included in the plan of a computational experiment, the purpose of which is to evaluate the functionality and manufacturability of the tested project. A feature of the proposed approach is that with significant energy consumption, the possibility of its redistribution to ensure the operation of the cooling circuit system with ice generators is not excluded. Due to the "saved" electricity, the backup ventilation system, being in the "cold" standby mode, is potentially ready to start the process of convection ventilation of the poultry shop when it is disconnected from the power grid for the period of repair and restoration work.

**Keywords:** poultry shop, natural ventilation, cooling unit, heat exchange

**Для цитирования:** Ротова В.А., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Нейфельд Е.В., Иванов П.А., Резанов А.И. Методологический аспект проблемы развития резервных энергосберегающих систем вентиляции // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025. Т. 55. № 6. С. 106–121. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-6-10>

**For citation:** Rotova V.A., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Neifeld E.V., Ivanov P.A., Rezanov A.I. Methodological aspect of the problem of development of backup energy-saving ventilation systems. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2025, vol. 55, no. 6, pp. 106–121. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-6-10>

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

#### **Благодарность**

Авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

#### **Acknowledgements**

The authors express their gratitude to the anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Анализируя процесс теплообмена в помещении птицеводческого цеха, следует обратить внимание на факт значимого влияния конвекции на создание микроклиматической среды внутри технологического пространства, что позволяет рассматривать вопросы модернизации вентиляционных систем с точки зрения расширения опциональных возможностей, но с учетом внештатных ситуаций. В данном случае речь идет о рассмотрении функции удаления отработанной воздушной массы из внутреннего пространства помещения для содержания птицы в период аварийного выхода из строя системы климат-контроля или нарушения электроснабжения птицеводческого комплекса. В таких обстоятельствах зарезервированная опция перехода к процессу естественной вентиляции оказывается экстремально обязательной.

Причем режимно-параметрические характеристики по расходу воздуха, температурной стабилизации и длительности сохранения жизненно необходимого уровня указанных параметров в аспекте фактора времени, максимально необходимого для проведения ремонтных работ, должны достоверно исключать вероятность массовой гибели птицы в кризисный период.

Если система вентиляции птицеводческого цеха переходит в аварийное состояние при низких или отрицательных температурах окружающей среды, то минимально необходимый воздухообмен в технологическом помещении можно обеспечить посредством оперативного открытия всех имеющихся технологических проемов для сообщения с внешним пространством. За счет температурного перепада будет происходить заток свежего воздуха через расположенные в цехе крышесые колодцы, настенные воздушные

клапаны, функциональные проемы для вентиляторов и транспортные проемы. Допустимо, хотя технически крайне сложно, проводить кратковременные ремонтно-профилактические работы без эвакуации поголовья из нефункционального помещения.

Сложность вопроса сохранения поголовья птицы повышается в жаркий сезон, когда температурный перепад между окружающей средой и внутренним температурным полем практически отсутствует, а воздухообмен в технологическом помещении возможен только с помощью принудительной вентиляции, в результате работы которой сезонное потребление электроэнергии возрастает на 300–400%. К тому же снижение термической напряженности в птицеводческом цехе архитектурно-геометрическими характеристиками проекта, как правило, не предусматривается. Следовательно, выход из строя системы вентиляции или прекращение электроснабжения даже на короткое время в период высоких температур гарантированно приведут к перегреву и отравлению отработанным воздухом практически всего поголовья.

Решение проблемы следует искать в области ключевого физического явления, характерного для тепло- и воздухообменных процессов, реализуемых на производственных и жилищно-бытовых объектах, где отсутствует или не является рентабельной принудительная вентиляция. Речь идет о конвекционном ориентированном перемещении воздушных потоков, распределяемых в температурном и газонасыщенном полях ограниченного пространства, и необходимости установки соответствующего технологического оборудования.

Стандартный птицеводческий цех в период аварийного состояния вентиляционной системы представляет собой именно такой объект. И если для птичников полуоткрытого и открытого типов параметры внутреннего воздуха не нормируются, то для закрытых технологических помещений в жаркий период года расчетная температура внутреннего воздуха должна быть не более чем на 5 °С выше среднемесячной температуры наружного воздуха в 13 часов самого жаркого месяца.

При этом температура воздуха внутри помещения должна составлять не более 34 °С для цыплят в возрасте от 1 до 10 дней, не более 31 °С – для других возрастных групп яичной птицы, не более 29 °С – для мясной птицы. Превышение температурой внутреннего воздуха указанных величин возможно только при внесении соответствующих требований в задание на проектирование. При этом теплосодержание внутреннего воздуха птицеводческих зданий не должно превышать 71 кДж/кг (17 ккал/кг) для цыплят в возрасте до 50 дней, 67 кДж/кг (16 ккал/кг) – для остальных возрастных групп.

Следует иметь в виду, что в задание на проектирование входят периоды аварийного состояния вентиляционных и увлажнительных систем. К тому же для районов с расчетной температурой наружного воздуха 25 °С и выше в теплый период года в 13 часов для самого жаркого месяца рекомендуется учитывать испарительное адиабатическое охлаждение и увлажнение приточного воздуха. Кроме того, для наполнения оросительных камер и увлажнителей, а также для питания форсунок систем местного доувлажнения следует применять воду питьевого качества [1, 2].

В принципе, схемно-функциональное и техническое решение вентиляционной системы естественно-проточного типа для исследуемого нами объекта возможно, но тогда необходимо дополнительно оценить возможность прикладного моделирования в рамках принципиальной схемы, разработка которой концептуально строится на основе теплофизики, термодинамики и теплотехники. Для этого следует проработать ряд вопросов: насколько рекомендуемое направление целесообразно в приложении к проектам естественно-проточных вентиляционных систем; возможно ли использование фрагментированного процесса из технологии адиабатического охлаждения; каким образом можно синтезировать резервную вентиляционную систему на базе технологического оснащения, уже смонтированного в помещении для содержания птицы?

Известно, что адиабатический процесс представляет собой термодинамический про-

цесс в системе без теплообмена с окружающей средой, т.е. в результате него в окружающее пространство не выделяется теплота, но одновременно происходят снижение температуры и увлажнение воздушной массы. Следовательно, адиабатические системы охлаждения относятся к технологиям охлаждения, использующим принципы термодинамики для снижения температуры воздуха или воды без необходимости внешней теплопередачи. В этих системах снижение температуры достигается за счет расширения газов или испарения воды.

В свою очередь, система адиабатического увлажнения воздуха проектируется как климатическое устройство либо группа взаимосвязанных устройств, использующихся для повышения влажности в помещении без изменения внутренней энергии воздуха. Данным системам свойствен впрыск воды через форсунки после ее глубокой предварительной очистки. Обычно такие системы активно применяют с целью повышения относительной влажности в жилых и административных помещениях.

Проблема заключается в том, что при масштабной аварии системы электроснабжения происходит остановка работы и вентиляционного оборудования, и системы водоснабжения. В этой связи актуальным становится оперативное подключение альтернативных источников энергии, которые позволят сохранить жизнедеятельность продуктивного поголовья на период проведения ремонтных работ систем климат-контроля или прекращения подачи электроэнергии на технологические объекты.

Существует много видов современного оборудования для обеспечения сельскохозяйственных комплексов резервными источниками электроэнергии: электрогенераторы, резервные мини-электростанции, газовые промышленные генераторы, дизель-генераторные установки и др. Анализ потребления электроэнергии, расходуемой на работу системы вентиляции в птицеводческом цехе, показал, что минимальное потребление составило 2302 кВт · ч (март), максимальное – 22 740 кВт · ч (август). Для обеспечения

бесперебойной работы птицефабрики необходимо, например, восемь дизель-генераторных установок ДЭС 3000 общей мощностью 24 000 кВт, приобретение и техническое обслуживание которых требует существенных материальных затрат (общая стоимость с доставкой и установкой от 100 000 до 200 000 р. за каждый прибор). К другим недостаткам использования ДЭС можно отнести: выбросы в атмосферу оксидов азота, сажи и других загрязняющих веществ; высокий уровень шума; зависимость от наличия дизельного топлива, что может создавать определенные сложности в удаленных районах.

Вряд ли инженерные службы птицеводческих комплексов будут рассматривать проект реализации регенеративной энергетики как резервной, если техническое решение сфокусировать на волновую или приливную энергию морской воды. Гидротемпературный градиент и геотермальные источники как энергофункционал также являются для птицеводческой отрасли сферой риторических прогнозов – даже в мировом производстве электроэнергии это направление реализуется на уровне 0,5%. Установка солнечных батарей либо ветрогенераторов на территории птицеводческих комплексов нецелесообразно в силу нестабильности природно-климатических факторов. В качестве варианта можно рассматривать интегрирование в технологическую систему птицеводческих комплексов таких источников альтернативной энергии, как тепловые насосы.

Создание резервных вентиляционных мощностей как актуальная проблема птицеводческого аграрно-промышленного сектора обуславливает необходимость разноаспектного анализа всего ассортимента оборудования, имеющегося в серийном производстве. Например, практика использования тепловых насосов и эксплуатации геотермальных источников подтверждает возможность производства искусственного холода, необходимого для создания перепада температур при конвекционном формировании направленных воздушных потоков за счет геотермальной энергии.

Энергию данного вида можно использовать двумя способами. Во-первых, геотермальную энергию высокого потенциала (свыше 100 °С) можно преобразовать в электрическую с дальнейшим использованием в парокompрессионной или термоэлектрической холодильной установке. Во-вторых, теплоту геотермального теплоносителя среднего потенциала (свыше 60 °С) можно использовать в циклах теплоиспользующих абсорбционных термотрансформаторов, оборудование которых позволяет вырабатывать искусственный холод летом. Но ни в первом, ни во втором случае задействовать системы ледогенерирования и запустить конвекционное движение воздушных потоков в период аварийного состояния электроснабжения птицеводческого комплекса не представляется возможным. Причина простая – в обоих вариантах для выработки искусственного холода необходима та же электроэнергия. Поэтому рабочая документация не предусматривает и не включает в функциональную структуру указанных объектов принципиальные схемы и технические решения геотермальных тепловых пунктов.

В этой связи поиск решения проблемы жизнеобеспечения продуктивного поголовья в птицеводческих цехах предполагается вести в «пространственно-временной» дискретности, что можно интерпретировать как заблаговременное формирование технологических предпосылок, не оказывающих влияния на системный процесс до момента сбоя в нем. В случае аварийного нарушения технологического режима системный процесс будет восстановлен и будет поддерживаться в течение времени, необходимого для проведения ремонтных работ. В результате исключается взаимопроникновение или наложение режимных характеристик, которое может привести к параметрической трансформации технологических показателей и отрицательно повлиять на состояние птицы. Тезис о «заблаговременности формирования технологических предпосылок» вытекает из условий моделирования функциональной структуры и принципиальной схемы технического решения резервной системы вентиляции.

Условие первое: технологические предпосылки формируются перманентно – только в процессе работы основной системы климат-контроля при оптимальном режиме ее эксплуатации до момента входа в аварийное состояние. В случае остановки систем и механизмов, запитанных от электросети, прекращается формирование температурных полей и векторных воздушных потоков в цехе. Тогда же прекращается накопление ресурса потенциального активатора конвекционного воздухообмена и конвекционного теплообмена; режим климат-контроля из принудительного вентиляционного (обычно тоннельного) типа трансформируется в естественно-приточный. При аварии системы электроснабжения в особенно опасный высокотемпературный летний сезон альтернативный режим воздухообмена позволит избежать массовой гибели птицы. Но для приведения воздушной массы в динамическое состояние необходимо перераспределение расхода электроэнергии на предприятии с учетом исполнительных механизмов и устройств, управляющих процессом формирования необходимых режимных параметров резервной системы вентиляции.

Отсюда вытекает второе условие: между предполагаемой функциональной структурой резервной системы вентиляции и принципиальной схемой ее технического решения нужно предусмотреть проведение вычислительного эксперимента, факторность которого должна агрегировать на оптимизацию энергозатрат по исполнительным механизмам и уровень их эксплуатационной технологичности. В основе методологической формализации вычислительного эксперимента целесообразно использовать систему, синтезированную из математических моделей технологических фрагментов производственной среды. В данном случае интерес представляют направленность и интенсивность конвекционных потоков, влияющих на воздухообмен [1, 3].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Особенностью технической реализации резервной системы вентиляции для помещения птичника является наличие ледогенера-

торов. Именно ледогенераторы в любом техническом исполнении, будь то холодильные камеры, морозильники или любой другой тип намораживающих устройств, способных производить, удерживать и накапливать ледяную массу, являются активаторами конвекционных потоков. Проект оборудования птичника не представляет технических сложностей. Для инженерной службы установка двух холодильных контуров трубчатого типа по периметру технологического помещения не вызовет проблем. Но вопрос активации альтернативного режима воздухообмена как процесса требует анализа функционала интегрированной системы с позиции физики и термодинамики, т.е. необходима формализация причинно-следственных взаимосвязей на уровне методологических основ.

Следует иметь в виду, что в накопителях тепловой энергии преимущественно применяются вещества с фазовым переходом (ВФП) типа «твердое тело – жидкость». Их в основном подразделяют на органические, неорганические и эвтектики (эвтектические растворы) [4]. К органическим ВФП относятся парафины, жирные кислоты и другие соединения. В ряде случаев в качестве аккумулирующей среды системы кондиционирования и вентиляции применяется вода. Она характеризуется большими величинами удельной теплоемкости и удельной теплоты замерзания (плавления льда) – 4,184 кДж/(кг·К) и 335 кДж/кг соответственно. При использовании в аккумуляторах льда, изготовленного из воды, объемы емкостей будут находиться в пределах допустимых размеров и могут быть установлены на стенах птицеводческого помещения по периметру. Кроме того, при таянии льда образуется вода, которая способствует повышению влажности в птичнике, что также необходимо для поддержания жизнедеятельности поголовья в жаркий период года при отключении системы кондиционирования.

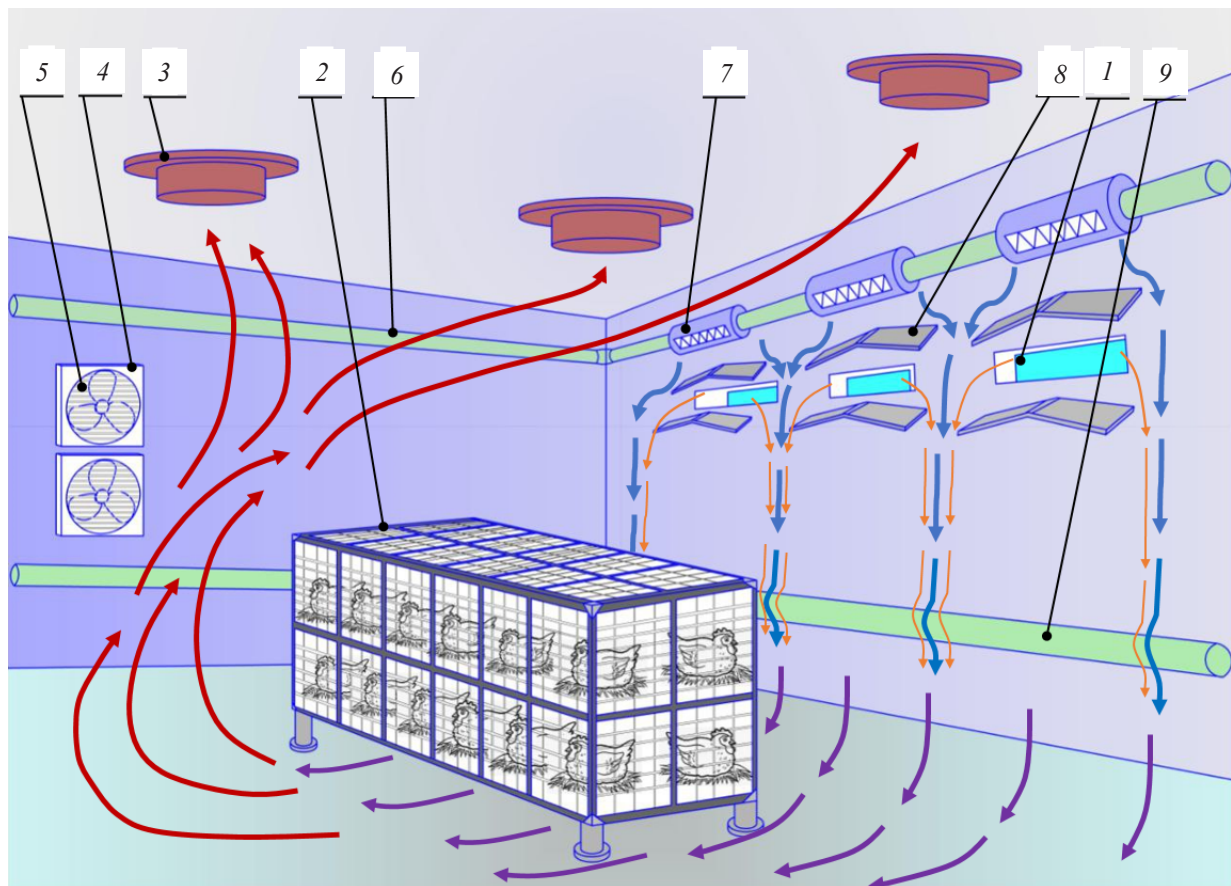
Далее рассмотрим, из чего состоит и как работает резервная система вентиляции, предполагаемая к внедрению в птицеводческих комплексах, расположенных в зонах с высокотемпературными летними периода-

ми. Как правило, стандартный проект помещения для содержания птицы, оборудованного принудительной системой вентиляции тоннельного типа, предусматривает проемы для сообщения с окружающей средой, через которые происходит захват свежего воздуха при удалении тоннельными вентиляторами скопившихся газов биологического происхождения (см. рис. 1). К таким проемам относятся: воздушные клапаны (1), расположенные по всей длине в верхней части несущих стен вдоль рядов кассет с клетками для содержания кур (2); вентиляционные колодцы (3), размещенные вдоль продольной оси на крыше цеха (как вариант допускается использование модели с электроприводным вентилятором); технологические проемы (4) под установку тоннельных вентиляторов (5) на одной из торцевых стен цеха.

При отсутствии электричества и идентичности температурных режимов внутри и снаружи помещения цеха воздухообмен в нем практически полностью прекращается. Активация перемещения воздушной массы сразу после отключения электричества осуществляется посредством дополнительного оборудования с заданными функционально и заблаговременно стабилизированными режимными параметрами, позволяющими благодаря использованию всех проемов технологического помещения формировать конвекционные воздушные потоки и векторно распределять их по секторам размещения птицы.

С этой целью по всему периметру цеха на уровне выше воздушных клапанов монтируется трубопровод (6), канализирующий хладагент к ледогенераторам (7), установленным непосредственно над воздушными клапанами, оборудованными Delta пластинами (8). Кроме этого, по периметру прокладывается нижний контур холодильного трубопровода (9). При этом расстояние от пола до точек крепежа нижнего контура не должно превышать высоты установки над полом нижнего яруса клеток с птицей.

В процессе работы основной вентиляционной системы происходят охлаждение трубопроводов и постепенное намораживание



**Рис. 1.** Схема размещения охлаждающего контура с ледогенераторами  
**Fig. 1.** The layout of the cooling circuit with icemakers

льда в ледогенераторах. Выход из строя системы электроснабжения прекращает принудительное удаление использованного воздуха из технологического помещения, процесс переходит в режим конвекционного воздухообмена – охлажденный ледогенераторами пристенный каскад воздушной массы начинает перемещаться вниз, обтекая по Delta пластинам проемы воздушных клапанов, что приводит к образованию эффекта разряжения в межпластинном пространстве и захвату из окружающей среды воздуха, насыщенного кислородом.

Чтобы смешение горячего воздуха из атмосферы с холодным не замедляло нисходящее перемещение потока и не привело к его преждевременному рассеиванию, нижний контур холодильного трубопровода выполняется по проекту, хотя и без установки ледогенераторов, но более массивным по всей своей длине. Это обеспечивает: во-первых,

стабилизацию температурного режима пристенного каскада воздушной массы на уровне конвекционного перепада; во-вторых, векторное формирование циркуляционного движения воздушной массы в технологическом помещении с учетом проходного пространства под нижним ярусом клеток с птицей. Таким образом, тяжелые газы (углекислый газ, сероводород, аммиак) выдавливаются охлажденным потоком к вентиляционным колодцам и частично, в силу неустойчивости их ламинарного движения, к технологическим проемам, где установлены тоннельные вентиляторы, которые из-за отключения электричества перестали функционировать.

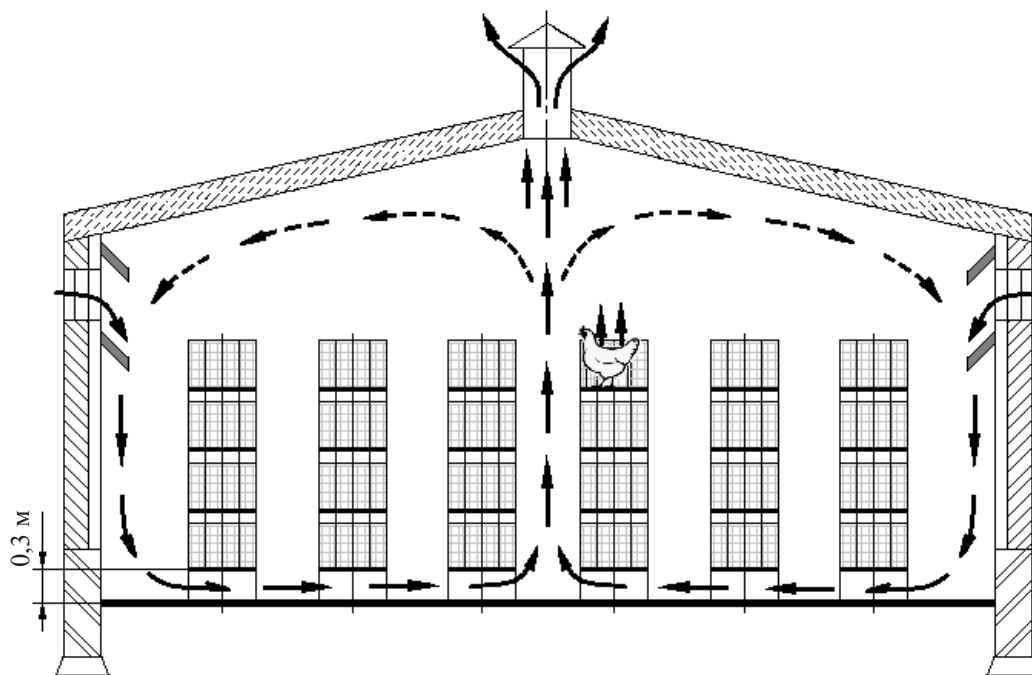
Если проводить аналогию с областью гидродинамики, то проектируемая функциональная структура в результате проведения вычислительного эксперимента должна подтвердить возможность реализации так называемой вертикальной турбулентности, харак-

терной для перемещения водной массы в руслах рек, или одного из элементов водоворота в природной среде. Как долго и как интенсивно будет осуществляться воздухообмен в режиме вертикальной турбулентности, зависит от объема технологического пространства, а также от мощности ледогенераторов. Эта тема подлежит детальному анализу с выходом на конструктивно-технологические параметры оборудования, обеспечивающего резервное (альтернативное) замещение системы принудительной вентиляции при ее выходе из строя<sup>1</sup> [1, 5].

Если абстрагироваться от технологического процесса в птицеводческом цехе и рассматривать его как геометрическое пространство, заполненное геометрическими телами – клетками для содержания птицы, то гипотетически конвекционное формообразование воздушных потоков в указанном помещении будет иметь поверхность искаженного тороида или тороида, вписанного в параллелепипед технологического пространства для содержания птицы (см. рис. 2). С целью обеспечения полноценного воздухообмена

и оптимизации теплообменных процессов в помещении при расчете коэффициентов теплоотдачи, теплопередачи, кратности воздухообмена целесообразно работать с моделью тороида закрытого типа, что является условием адекватности траектории конвекционных потоков не только геометрии технологического пространства, но и зонам расположения проемов для сообщения с окружающей средой.

Опыт проведения лабораторных и производственных испытаний на всем протяжении развития научно-технического прогресса показывает сложность и значительную затратность большинства исследовательских процедур при работе с крупномасштабными объектами, особенно если переход к техническому решению связан с созданием стендовых имитационных комплексов. Сложности начинают геометрически прогрессировать, если план испытаний стендового оборудования предполагает использование в эксперименте опытных групп животных или птицы. К тому же внедрение инновационного проекта может окончательно утратить свой-



**Рис. 2.** Конвекционное формообразование воздушных потоков

**Fig. 2.** Air flow convection shaping

<sup>1</sup>Гадаборшева Т.Б., Ефремова Г.С., Захарьина А.Я. Анализ движения воздушных масс в помещениях со сложной планировкой // Интернет-вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (37). С. 1.



ство рентабельности, если достоверность принципиальной схемы не подтвердится при создании физической модели технического решения (даже при многократной коррекции опытного образца после его реконструирования по системе обратной связи с функциональной структурой технологического объекта).

Здесь следует добавить, что крупные корпусные сооружения, не предполагаемые проектом к расширению функциональной структуры, находятся в группе категорического запрета на нерегламентированную эксплуатацию несущих конструкций, что обусловлено повышением риска их разрушения. Именно по этой причине дополнительный функционал на технологический объект вводится только после проведения модельных исследований: технологической системы, совокупности технических объектов, агрегированных в ней, а также экономической системы как индикатора рентабельности инновационных преобразований [6, 7].

В рамках развиваемой темы представляет особую сложность и, соответственно, требует более внимательного изучения факт параметрической интеграции в едином гидродинамическом процессе – конвекционном воздухообмене. Переход от функциональной структуры к достоверной принципиальной схеме и далее – к техническому решению резервной системы вентиляции возможен только посредством комплексной оптимизации физических, технологических, а также функциональных параметров, реализующих ее эксплуатационный режим.

Только благодаря вычислительному эксперименту можно уменьшить затраты на проведение исследований на основе крупномасштабных вычислительных процедур – отладка и калибровка программных моделей под имитацию технологического оборудования несоизмеримо дешевле «компилирования» приборной базой в ее натуральном исполнении. Но вычислительный эксперимент – это прежде всего целевое компьютерное моделирование для изучения поведения сложных систем и явлений, в основе которого лежит метод научного исследования, ориентирован-

ный на свойства сред и физико-химические величины, характеризующие возможность осуществления, а также состояние режимного процесса на технологическом объекте.

В качестве примера можно привести формализацию естественно-приточного перемещения воздушной массы при переходе от режима принудительного воздухообмена в птицеводческом цехе к воздухообмену на основе конвекционных потоков, активированных заблаговременно сгенерированной ледяной массой.

Таким образом, целью исследований, представляемых настоящей публикацией, являются определение путей и формализация методологических основ оптимизации структуры, а также режима функционирования резервной вентиляционной системы конвекционного типа в крупномасштабных технологических помещениях для содержания биологических объектов [8–10].

С течением времени внутри птицеводческого цеха в результате перемешивания воздуха будет наблюдаться сравнительно равномерное распределение температуры ( $t_{\text{внутр}}$ , °C), что позволяет принимать одинаковое значение  $t_{\text{внутр}}$  при расчете теплообмена на всех поверхностях (порядка 30 °C). Исключением может стать неравномерность температуры по высоте от переизбытка теплоты, поступающей от птицы и оборудования при работе цеха без системы вентиляции в случае ее аварийного отключения. В результате действия конвективных токов теплого воздуха над клетками с птицей под сводом цеха достаточно быстро образуется слой нагретого воздуха («тепловая подушка»).

Температура внешнего воздуха ( $t_{\text{внеш}}$ ) в жаркий период года примерно сопоставима с температурой внутри птицеводческого помещения. Тепловой поток, поступающий от оконных проемов цеха ( $Q_{\text{ок}}$ , Вт), рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{ок}} = \alpha \cdot S_{\text{ок}} \cdot (t_{\text{внеш}} - t_{\text{внутр}}),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S_{\text{ок}}$  – площадь поверхности оконных проемов, м<sup>2</sup>.

Если  $t_{\text{внеш}} < t_{\text{внутр}}$ , то часть теплового потока будет перетекать из помещения на улицу. В жаркий период года возможна обратная ситуация: если  $t_{\text{внеш}} > t_{\text{внутр}}$ , тогда тепловой поток с улицы усилит тепловое воздействие на воздух в цехе, и температура внутри начнет расти более стремительно.

При рассмотрении свободной конвекции в окружающую среду математическая модель будет учитывать только неравномерность плотности воздуха, возникающую под действием изменения температур. Принимая, что плотность воздуха, формируемая под действием давления, во всем исследуемом объеме постоянна, температурное поле в воздушной среде следует считать двумерным и изменяющимся по осям  $x$  и  $y$ .

Аналитическое выражение для двумерного температурного поля среды  $t = t(x, y)$  записывается как

$$t = 0,05(t_x - t_{\text{внутр}}) \left( \frac{y}{x} \left( \frac{1}{4} Gr_x \right)^{\frac{1}{4}} - 4,5 \right)^2 + t_{\text{внутр}},$$

где  $t_x$  – температура холодильной установки, °С;  $t_{\text{внутр}}$  – начальная температура воздуха в помещении, °С;  $Gr_x$  – локальный безразмерный критерий Грасгофа.

Определение числа Грасгофа для воздуха можно произвести по формуле

$$Gr_x = \frac{g\beta(t_2 - t_1)}{l^3\rho^2},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения среды, К<sup>-1</sup>;  $t_1$  и  $t_2$  – температура в разных точках, °С;  $l$  – определяющий размер, м;  $\rho$  – плотность сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Логично, что закономерность изменения температурного поля среды дает возможность аналитически определить температуру в любой точке пространства. Таким образом, если температура поверхности холодильной установки  $t_x$ , следовательно, излишек температуры ( $\Delta t$ , °С) при заданной модели теплообмена в помещении будет рассчитываться, исходя из выражения

$$\Delta t = t_x - t.$$

Расчет излишков температуры необходим для определения коэффициента конвектив-

ного теплообмена и количества теплоты, которое можно удалить из помещения при помощи холодильной установки.

Около охлаждающей установки (ледонакопителя) возникают конвективные токи, которые вызывают теплообмен между этими поверхностями и воздухом. Если поверхность охлаждена, то воздух вокруг нее тоже охлаждается и опускается вниз, вытесняя нагретый воздух, который имеет меньшую плотность. В зоне начала движения пристенный пограничный слой является ламинарным (см. рис. 3). Исследования показали, что максимальная скорость движения воздушного потока наблюдается именно при ламинарном режиме теплообмена. Переход от ламинарного режима к турбулентному происходит на некотором расстоянии от начала поверхности ( $l_{\text{кр}}$ , м). При температуре помещения 30 °С расстояние  $l_{\text{кр}}$  можно найти по формуле

$$l_{\text{кр}} \approx \frac{1,87}{\sqrt[3]{\Delta t}}.$$

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена ( $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)) в пределах всей области ламинарного режима теплообмена от 0 до  $l_{\text{кр}}$  при температуре в помещении 30 °С определяется из выражения

$$\alpha_k = 1,16 \sqrt[3]{\Delta t}.$$

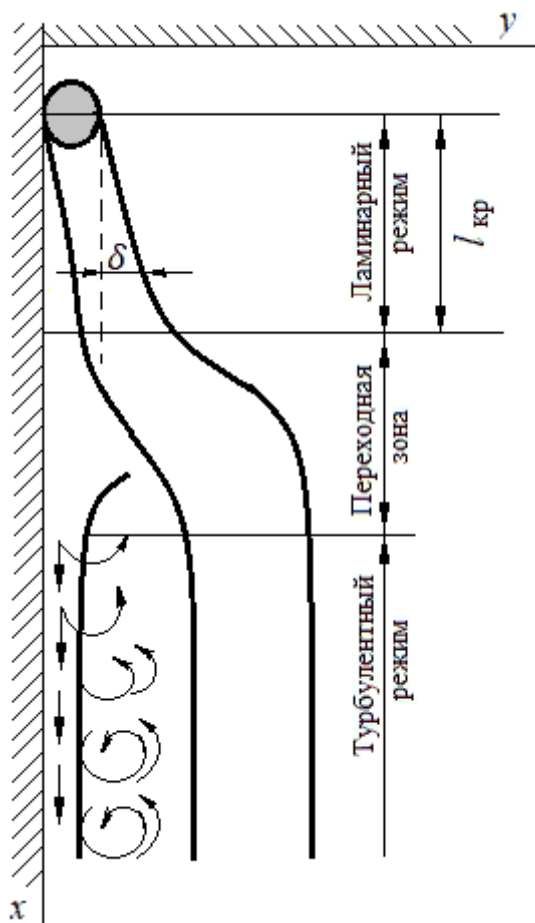
Искомый тепловой поток  $Q$ , поглощаемый холодильной установкой из окружающего воздуха, составит

$$Q = S \cdot \alpha_k \cdot \Delta t, \text{ Вт},$$

где  $S$  – площадь холодильной установки, м<sup>2</sup>.

В ниспадающем холодном потоке около вертикальной поверхности стен технологического помещения физически образуется пограничный слой, толщина которого растет по направлению движения. При этом максимальная скорость движения охлажденного воздушного потока постепенно уменьшается. На некотором расстоянии от нижней границы охлажденной поверхности режим течения становится турбулентным, и наблюдается дальнейшее снижение скорости движения.

Исследование принципа перемещения воздушной массы от верхнего уровня охлаж-



**Рис. 3.** Схема послойного распределения нисходящего потока воздуха при свободной конвекции  
**Fig. 3.** The scheme of layer-by-layer distribution of downward air flow at free convection

дения, где холодный поток формируется под воздействием ледогенератора, до пола технологического помещения показало актуальность физического аспекта реализации именно ламинарного режима течения нисходящих струй конвекционирующего воздуха. Только в этом случае не произойдет снижение скорости движения охлажденного воздушного потока, что является обязательной предпосылкой эффективности функционирования естественно-принудительной вентиляции<sup>2</sup> [11].

Технически пролонгировать ламинарный режим можно за счет создания дополнительных концентраторов холода на траектории нисходящих струй конвекционирующего воздуха. Ниже по высоте стен птицеводческого цеха на расстоянии  $l_{кр1}$  от первого верхнего ледогенератора, в месте перехода потока в турбулентный режим, устанавливается дополнительный охлаждающий элемент. Аналогично на расстоянии  $l_{кр2}$  от второго ледогенератора, а также  $l_{крn}$  для  $n$ -го охлаждающего элемента (см. рис. 4). Такое расположение охлаждающих элементов позволит поддерживать контролируемую разность температур  $\Delta t_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) в воздушном потоке и максимально ускорить векторное движение холодных струй воздуха к полу птицеводческого цеха.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчетно-методического апробирования принимались характеристики конвекционного теплообмена на свободно расположенной вертикальной охлаждающей поверхности с учетом параметров холодогенерирующей системы для помещения птицеводческого цеха<sup>3</sup>.

Помещение цеха имеет следующие размеры: длина 96 м, ширина 18 м, высота по свесу 4 м. В начальный момент времени  $t_{внутр} = 30$  °С. В жаркий период года усредненное значение  $t_{внеш} = 35$  °С. Температура охлаждающих элементов ледогенератора составляет  $-15$  °С. Ледогенератор представляет собой цилиндрическое тело диаметром 0,6 м, расположенное интервально по всей длине стен технологического помещения.

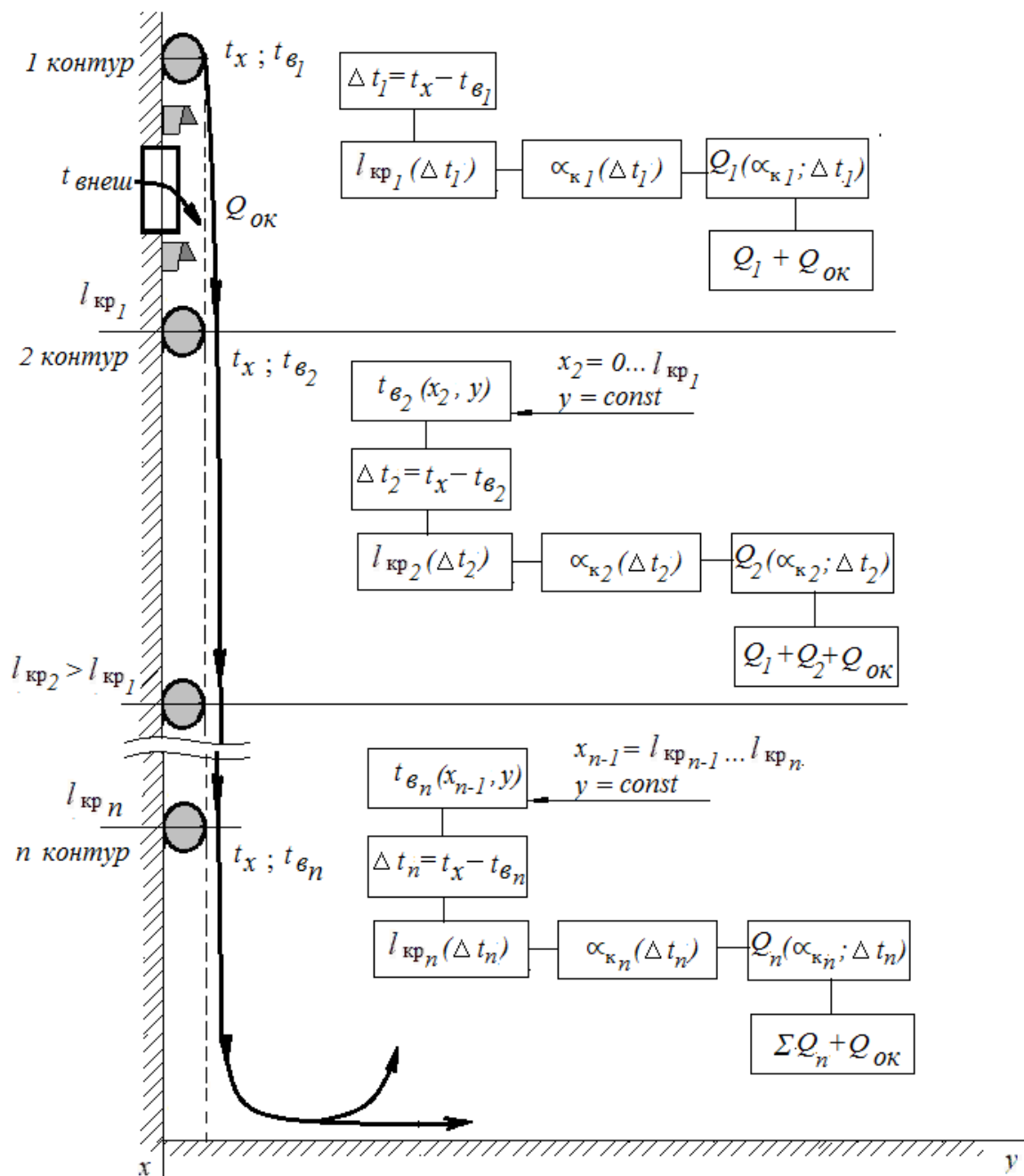
Расчетная площадь боковой поверхности исследуемого птицеводческого цеха:

$$S = 2\pi rh = 2\pi \cdot 0,3 \cdot (96 + 18) \cdot 2 = 430 \text{ м}^2.$$

Суммарный размер площади оконных проемов птицеводческого цеха:  $S_{ок} = (0,3 \times 0,5) \times 22 = 3,3 \text{ м}^2$ ; коэффициент конвективного

<sup>2</sup>Митрофанов В.А. К расчету теплоотдачи с неравномерно нагретой плоской стенки в стабилизированный турбулентный поток охлаждающей жидкости // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия: Естественные и технические науки. 2015. № 3. С. 57–63.

<sup>3</sup>Макаров С.С., Карпов А.И., Макарова Е.В. Математическая модель конвективного теплообмена потока охлаждающей жидкости, двигающегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 1. С. 32–40.



**Рис. 4.** Расчетно-функциональная схема параметрической модели конвекционного теплообмена  
**Fig. 4.** Computational and functional scheme of the parametric model for convection heat exchange

теплообмена с оконными проемами:  $\alpha_{ок} = 1,16\sqrt[3]{35 - 30} \approx 1,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; тепловой поток, поступающий в цех от оконных проемов:  $Q_{ок} = 3,3 \cdot 1,98 \cdot 5 = 32,72 \text{ Вт}$ .

Таким образом, наличие оконных и прочих проемов не оказывает существенного влияния на тепловое поле внутри помещения из-за своих незначительных размеров,

но обеспечивает доступ кислорода, необходимого для поддержания жизнедеятельности поголовья.

Расчет количества теплоты, поглощаемой каждым из ярусных контуров ледогенераторов, а также суммарного количества теплоты, поглощаемой всей системой, представлен в виде алгоритма на рис. 5.

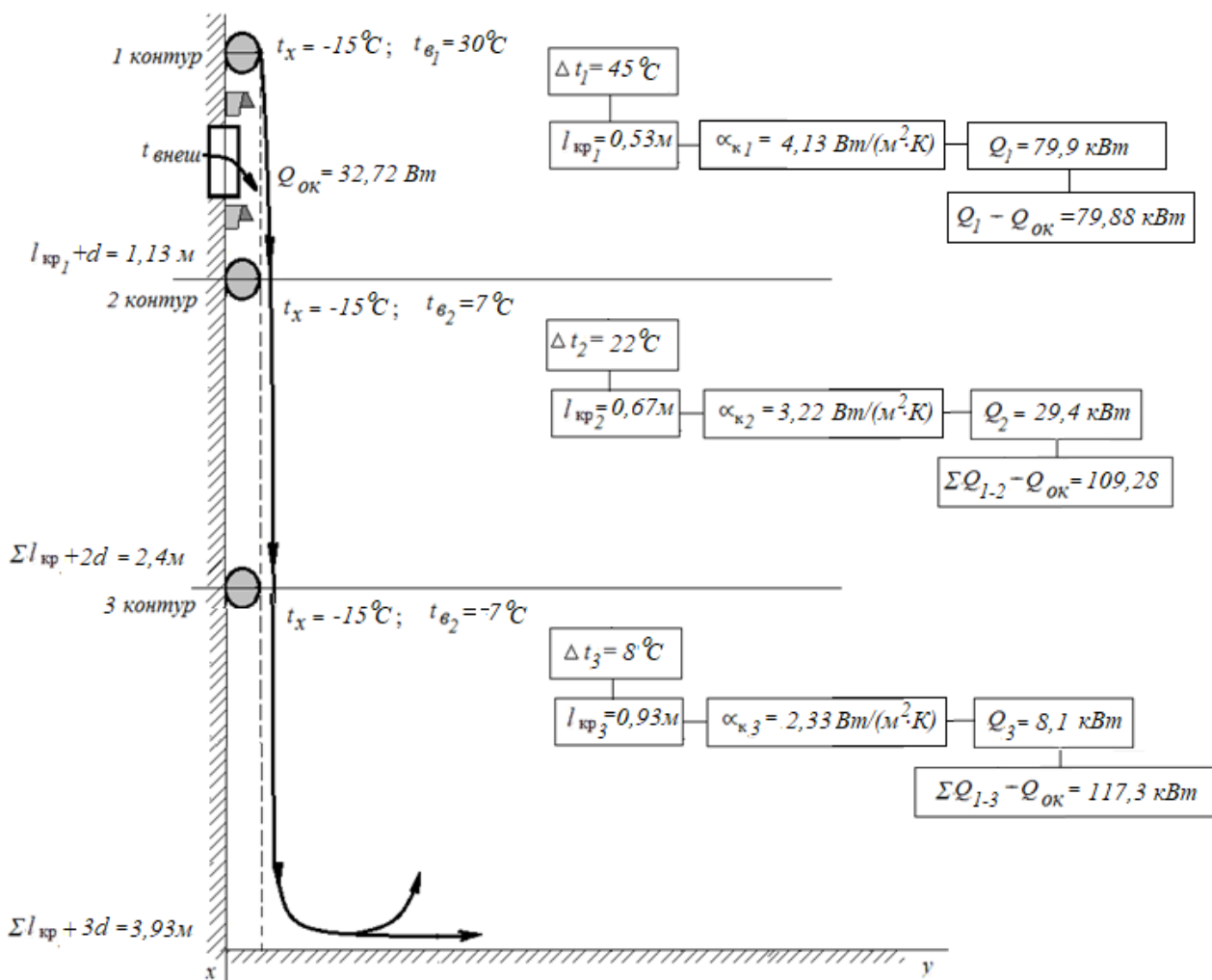


Рис. 5. Алгоритмизованная структурно-функциональная схема элементов охлаждения конвекционных потоков для исследуемого помещения птицеводческого цеха

Fig. 5. Algorithmized structural and functional scheme of the cooling elements of convection flows for the studied poultry workshop premises

Первый контур ледогенераторов расположен на максимально возможной высоте под потолком птицеводческого цеха над оконными проемами, где скапливается наиболее нагретый воздух. Количество теплоты, которое способен поглотить первый контур ледогенераторов ( $Q_1$ ), составляет 79,9 кВт. Проведенные расчеты показали, что количество теплоты, поглощаемой ледогенераторами второго контура ( $Q_2$ ), составляет 29,4 кВт и значительно снижается по сравнению с ледогенераторами первого контура. Это обусловлено тем, что температура внутри пристенного ламинарного слоя сильно падает и теплообмен замедляется. Согласно расчетам, третий контур ледогенераторов поглощает еще меньше

теплоты:  $Q_3 = 8,1$  кВт. При этом температура воздуха внутри ламинарного слоя становится отрицательной ( $t_{внутри} = -7$  °C), излишек температуры окружающего воздуха снижается до 8 °C. Такие значения температур являются нежелательными, так как могут привести к переохлаждению птицы, находящейся в ближайших к ледогенераторам рядах клеток.

В соответствии с санитарно-биологическими требованиями и на основании проведенных расчетов можно утверждать, что для работы предлагаемой модели охлаждения воздуха в птицеводческом цехе достаточно двух контуров ледогенераторов, расположенных по периметру помещения. Первый контур задает движение охлажденных воз-

душных масс по направлению вниз (к полу помещения), второй контур продлевает ламинарный режим движения охлажденных воздушных масс и вынуждает охлажденный поток воздуха продолжать дальнейшее движение к полу под действием разности температур и плотностей воздушных слоев в пристенном ламинарном слое. Охлажденная воздушная масса продолжает движение вниз к полу помещения цеха, затем попадает в подклеточное пространство, размеры которого позволяют пропустить накопленные запасы охлажденного воздуха к следующему межклеточному ряду. Вместе с тем поглощение избытков теплоты становится более интенсивным в турбулентном режиме смешения воздушных масс, который, в соответствии с расчетом, начинается с расстояния 1–2 м от стены, на которой расположены ледогенераторы.

В настоящее время планируются исследования для определения параметров турбулентного режима смешения воздушных масс с разностью температур соприкасающихся тепловых полей внутри помещения птицеводческого цеха. Предполагается создание комплексного алгоритма учета термоактивных препятствий на пути распространения охлажденной воздушной массы – в данном конкретном случае имеются в виду ряды касет с курами.

Дальнейшие исследования предполагается направить на реализацию представленной математической модели в лабораторных условиях. В качестве экспериментального образца планируется создание резервной аварийной системы охлаждения воздуха в помещении птицеводческого цеха на примере двухконтурной системы ледогенераторов в периоды термонапряженного состояния воздуха окружающей среды. В ходе эксперимента будет проведена оценка рисков, связанных с предварительной подготовкой резервной системы к аварийному периоду, что связано, как это ни парадоксально, со штатной работой основной вентиляционной системы. Чем дольше безаварийный период, тем больше риск перемерзания ледогенераторов. Для профилактики данной кризисной ситуа-

ции управление вентиляционными системами должно осуществляться контроллером, рационализирующим перераспределение электроэнергии между основной вентиляционной системой и системой намораживания ледяной массы в безаварийные периоды работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что создание аварийной естественной вентиляции возможно, но при обязательной реализации процесса холодоаккумулирования и дальнейшей (в случае перехода в аварийный режим) эксплуатации расположенных по периметру помещения птицеводческого цеха контуров системы охлаждения. Как показали расчеты, для обеспечения конвекционного перемещения воздушной массы с захватом насыщенного кислородом воздуха из окружающей среды в исследуемом объекте достаточно двух уровней охлаждающих контуров, обеспечивающих формирование ламинарных нисходящих потоков.

Предлагаемая резервная вентиляционная система предполагает создание значительной разности температур в помещении и, как следствие, активацию процесса циркуляции холодного воздуха в плоскостях с ортогональной ориентацией относительно стен технологического помещения. Однако говорить об уровне температурного и кислородного комфорта без проведения исследований влияния термоактивных препятствий на специфику трансформации ламинарных потоков и температурных полей крайне преждевременно. Более того, исследования трансрежимных явлений при переходе от ламинарного потокодвижения к турбулентному в фазе циклового завершения требуют особого внимания, поскольку это связано с эвакуацией отработанного воздуха из цеха и закономерным снижением интенсивности холодогенерирующих устройств во время обесточивания технологического объекта.

Экономический анализ затрат на электроэнергию показал, что годовое потребление электроэнергии при эксплуатации системы

вентиляции птицеводческого цеха составляет 127 988 кВт·ч. Затраты предприятия на приобретение электроэнергии при стоимости электроэнергии 6,3 р./кВт·ч составили 806 324 р.

Проведенный анализ показывает, что наибольшее потребление электроэнергии и наибольшие затраты приходятся на теплый период года, когда используется туннельная вентиляция. Причем при значительном расходе энергии не исключается возможность ее перераспределения для обеспечения работы системы охладительного контура с ледогенераторами. За счет «сэкономленной» электроэнергии резервная вентиляционная система, находясь в режиме «холодного» ожидания, потенциально готова запустить процесс конвекционного вентилирования птицеводческого цеха при отключении его от электросети на период проведения ремонтно-восстановительных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rotova V., Asmankin E., Ushakov Yu., Ivanov P., Neufeld E., Rezanov A. Functional redundancy of air exchange processes in technological premises for poultry keeping // Bio Web of Conferences: International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024). 2024. Vol. 130. P. 07006. DOI: 10.1051/bioconf/202413007006.
2. Мартынов Е.А. Система мониторинга микроклимата помещения для содержания цыплят-бройлеров // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 4 (28). С. 72–78.
3. Исаева Я.К. Имитационное компьютерное моделирование движения воздушных масс в тоннеле и их сравнительный анализ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 194–197. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-194-197.
4. Коломийцева А.В. Использование веществ с фазовым переходом для аккумуляции тепловой энергии // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. 2022. № 1. С. 111–120. DOI: 10.48081/pkdr3218.
5. Абдуллазянов Э.Ю., Старцева Ю.В., Гадборшева Т.Б., Карманов А.В., Гарькин И.Н. Моделирование движения воздушных масс в котлованах при строительстве объектов энергетического комплекса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 3–10.

6. Затонский А.В., Плехов П.В., Захаров В.В., Христолюбов Н.Н. Нестандартные подходы к организации климатических систем в центрах обработки данных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. № 23 (3). С. 24–34. DOI: 10.14529/ctcr230303.
7. Мурадов Ф.А., Таитемирова Н.Н., Эшбоева Н.Ф., Гозиев Х.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости ветра в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2024. № 1 (55). С. 48–61.
8. Бусахин А.В. Промышленная вентиляция // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2019. № 3. С. 18–29.
9. Алексеева Т.А. Компьютерное моделирование движения воздушных масс в группе городских зданий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 191–194. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-191-194.
10. Водолазская Н.В. Расчет параметров определенных технических систем на основе моделирования их сборочных процессов // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2018. № 9. С. 425–429.
11. Алексеева Т.А. Сравнительный анализ движение воздушных масс в зависимости от направления ветра // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 247–249.

#### REFERENCES

1. Rotova V., Asmankin E., Ushakov Yu., Ivanov P., Neufeld E., Rezanov A. Functional redundancy of air exchange processes in technological premises for poultry keeping. *Bio Web of Conferences: International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024)*, 2024, vol. 130, p. 07006. DOI: 10.1051/bioconf/202413007006.
2. Martynov E.A. The monitoring system of the microclimatic conditions for the maintenance of broiler chickens. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*, 2020, no. 4 (28), pp. 72–78. (In Russian).
3. Isaeva Ya.K. Simulation computer simulation of the movement of air masses in a tunnel and their comparative analysis. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical*

- sciences*, 2022, no. 8, pp. 194–197. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-194-197.
4. Kolomiytseva A.V. Use of substances with phase transition for the accumulation of thermal energy. *Vestnik Torajgyrov universiteta. Energeticheskaya seriya = Bulletin of Torajgyrov University. Energetics series*, 2022, no. 1, pp. 111–120. (In Russian). DOI: 10.48081/pkdr3218.
  5. Abdullazyanov E.Yu., Startseva Yu.V., Gadaborsheva T.B., Karmanov A.V., Garkin I.N. Modeling the movement of air masses in pits during the construction of energy complex facilities. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 2024, vol. 16, no. 1 (61), pp. 3–10. (In Russian).
  6. Zatonkiy A.V., Plekhov P.V., Zakharov V.V., Khristolubov N.N. Non-standard approaches to climate systems organization in data processing centers. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2023, no. 23 (3), pp. 24–34. (In Russian). DOI: 10.14529/ctcr230303.
  7. Muradov F.A., Tashtemirova N.N., Eshboeva N.F., Goziev Kh.I. Numerical modeling of 3D wind velocity field in the atmosphere. *Problemy vychislitel'noi i prikladnoi matematiki = Problems of computational and applied mathematics*, 2024, no. 1 (55), pp. 48–61. (In Russian).
  8. Busakhin A.V. Industrial ventilation. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)*, 2019, no. 3, pp. 18–29. (In Russian).
  9. Alekseeva T.A. Computer modeling of air mass motion in a group of urban buildings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 12, pp. 191–194. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-191-194.
  10. Vodolazskaya N.V. Calculation of parameters of certain technical systems based on modeling of their assembly processes. *Sborka v mashinostroenii i priborostroenii = Assembling in mechanical engineering, instrument making*, 2018, no. 9, pp. 425–429. (In Russian).
  11. Alekseeva T.A. Comparative analysis of the movement of air masses depending on the wind direction. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 12, pp. 247–249. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ротова В.А.**, доцент кафедры, кандидат технических наук, доцент; SPIN-код 8947-6803

**Асманкин Е.М.**, профессор кафедры, доктор технических наук, профессор; SPIN-код 3657-9731

✉ **Ушаков Ю.А.**, профессор кафедры, заведующий кафедрой, доктор технических наук, доцент; SPIN-код 3341-9789; **адрес для переписки:** Россия, 460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18; e-mail: 1u6j1a159@mail.ru

**Нейфельд Е.В.**, доцент кафедры, кандидат педагогических наук, доцент; SPIN-код 8036-3018

**Иванов П.А.**, доцент кафедры, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; SPIN-код 9975-3260

**Резанов А.И.**, аспирант; SPIN-код 2197-8891

## AUTHOR INFORMATION

**Victoria A. Rotova**, Assistant Professor, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor; SPIN-code 8947-6803

**Evgeny M. Asmankin**, Chair Professor, Doctor of Science in Engineering, Professor; SPIN-code 3657-9731

✉ **Yuriy A. Ushakov**, Chair Professor, Head of the Department, Doctor of Science in Engineering, Associate Professor; SPIN-code 3341-9789; **address:** 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia; e-mail: 1u6j1a159@mail.ru

**Elena V. Neifeld**, Assistant Professor, Candidate of Science in Pedagogics, Associate Professor; SPIN-code 8036-3018

**Pavel A. Ivanov**, Assistant Professor, Candidate of Science in Agriculture, Associate Professor; SPIN-code 9975-3260

**Alexandr I. Rezanov**, Post-graduate Student; SPIN-code 2197-8891

Дата поступления статьи / Received by the editors 04.04.2025  
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 30.04.2025  
Дата публикации / Published 15.07.2025