

УДК 636

**КИРСАНОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: kirvv2014@mail.ru

**ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Российская Федерация

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ В УСЛОВИЯХ ИНЕЕОБРАЗОВАНИЯ

Обеспечение микроклимата – важная и энергоемкая задача. Порядка 80% теплоты, затрачиваемой на отопление производственных помещений, удаляется через систему вентиляции. В животноводстве утилизировать теплоту вытяжного воздуха целесообразно в воздушно-воздушном рекуперативном теплообменнике. При охлаждении теплообменной стенки до температур ниже нуля со стороны вытяжного канала начинается процесс кристаллизации конденсата. Следовательно, целесообразно учитывать инееобразование. Свойства инея отличаются от свойств снега. С появлением инея имеет место одновременное развитие двух групп процессов: увеличивающих и уменьшающих теплоперенос. Получены аппроксимационные зависимости для определения коэффициентов относительной теплоотдачи и относительного сопротивления от продолжительности процесса. Построены зависимости изменения относительной тепловой мощности во времени. Отмечено, что режим течения флюида оказывает значительное влияние на эффективность тепло- и массопереноса. При этом прослеживается общий характер процесса: изначальное наращивание относительной тепловой мощности, далее наступает квазистационарный режим, а затем происходит снижение относительной тепловой мощности. Максимальная эффективность утилизации теплоты реализуется в квазистационарном режиме. Учет влияния инееобразования на интенсивность теплопередачи позволяет провести более точную оценку тепловых потоков, определить оптимальное время включения теплообменника в режим оттаивания и реализовать алгоритм динамического регулирования системы рекуперации теплоты с условием обеспечения максимальной тепловой мощности аппарата.

**Ключевые слова:** вентиляция, десублимация, инееобразование, квазистационарный режим, микроклимат, рекуперация теплоты, система микроклимата, теплообмен, теплоперенос, утилизация теплоты, энергосбережение.

**Введение.** Обеспечение требуемого микроклимата – важная и энергоемкая задача [1-6]. Процесс ассимиляции продуктов жизнедеятельности животных предполагает перманентный приток свежего воздуха и удаление отработанного. Причем текущая кратность воздухообмена зависит от поголовья животных, их половозрастной группы и свойств приточного воздуха. В зимний период года поддержание необходимого воздухообмена сопровождается расходами на его подогрев. При этом из производственных помещений удаляется теплый энергонасыщенный воздух. Затраты на нагрев приточного воздуха составляют около 80% в структуре расходов на отопление. Одним из путей снижения затрат на отопление является утилизация теплоты вытяжного воздуха.

На данный момент времени человечество работало массу вариантов решения задачи утили-

зации теплоты. В животноводстве утилизировать теплоту вытяжного воздуха целесообразно в воздушно-воздушном рекуперативном теплообменнике, изготовленном из недорогих, химически инертных материалов. Таким условиям удовлетворяют полимеры [7-9].

В воздушно-воздушном теплообменнике теплопередача осуществляется от нагретого вытяжного воздуха к холодному приточному. В рекуператорах это реализуется через непроницаемую разделяющую стенку.

При охлаждении теплообменной стенки до температур ниже нуля со стороны вытяжного канала начинается процесс кристаллизации конденсата [10-12].

В работе Д.А. Тихомирова [10] и других авторов образующийся слой инея рассматривается как источник гидравлического и термического сопротив-

ления в вытяжном канале, что справедливо только для развитого слоя десублимата. Более детальное изучение этого вопроса раскрывает неоднозначность картины.

**Цель исследований** – разработать технологию динамического регулирования рекуператора из условия реализации максимальной эффективности утилизации теплоты вытяжного воздуха в условиях образования инея в вытяжном канале аппарата.

**Материал и методы.** Свойства инея и характер его образования изначально ошибочно заимствовали у более изученного снега, что приводило к неточностям. Так, для оценки теплопроводности снега широко пользуются эмпирической зависимостью А.С. Кондратьевой:

$$\lambda_{сн} = 3,06 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{сн}^2.$$

В приведенной зависимости теплопроводность зависит лишь от плотности снега, что удовлетворительно в некоторых практических расчетах, но совершенно не раскрывает сути процессов, происходящих в слое снега и тем более инея.

Теплопроводность снега не является однозначной функцией плотности. Специалистами в области холодильного и криогенного оборудования замечено, что слой инея на теплообменных поверхностях аппаратов снижает эффективность теплопроводности в диапазоне крайне низких (криогенных) температур. При сравнительно невысоких температурах (близких к нулю) и относительно малой длительности процесса теплоизолирующие свойства инея не проявлялись. Более того, на начальном этапе процесса теплопередача осуществлялась эффективнее [13].

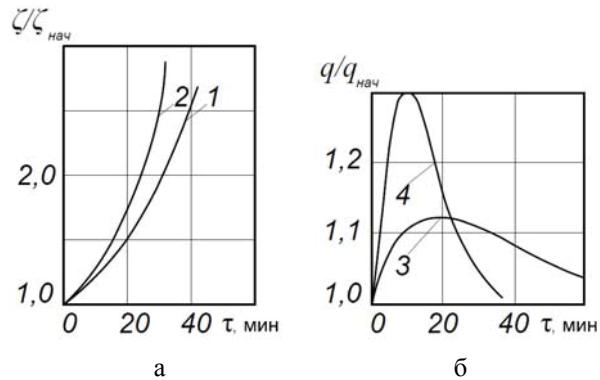
С возникновением инея эффективные коэффициенты теплопереноса увеличиваются. Это объясняется изменением свойств поверхности – растет ее шероховатость, а с ней развивается площадь поверхности теплообмена, что увеличивает конвективную составляющую теплопереноса. Дополнительно выделяется теплота фазового перехода воды (из газообразного в жидкое, а затем и в твердое состояние). А также увеличивается составляющая лучистого теплообмена, что связано с повышением коэффициента черноты шероховатой поверхности.

Таким образом, оценку теплоизолирующих свойств инея необходимо проводить с поправкой на одновременный, к тому же до определенной степени опережающий, рост коэффициента теплоусвоения (теплоотдачи).

Изменение относительного теплопереноса и относительного массопереноса во времени зависит от температуры поверхности теплообмена, режима течения и влажности воздуха (рис. 1).

Шероховатость поверхности в начале процесса инееобразования увеличивается и способствует

теплопередаче, что происходит за счет увеличения поверхности теплообмена. В развитии процесса шероховатость снижается, уменьшая за собой теплопередачу.



**Рис. 1. Зависимости коэффициентов относительного сопротивления (а) и относительной теплоотдачи (б) от продолжительности процесса десублимации, по данным Чена и Розену: 1, 3 – при  $Re_{cp} 2,2 \cdot 10^4$  и 2, 4 – при  $Re_{cp} 4,5 \cdot 10^4$  соответственно**

Следовательно, происходит одновременное развитие двух групп процессов: увеличивающих и уменьшающих теплоперенос. В определенных условиях эти процессы взаимно компенсируются и образуют квазистационарный режим, характеризующийся постоянством теплового потока, при выраженном изменении влияющих на него процессов [13].

**Результаты и обсуждение.** Для удобства использования в практических расчетах экспериментального материала, представленного на рисунке 1, его целесообразно аппроксимировать.

Полученные аппроксимацией расчетные формулы для определения коэффициентов относительной теплоотдачи и относительного сопротивления от продолжительности процесса приведены ниже. Коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$  составляет не ниже 0,95:

при  $Re_{cp} 2,2 \cdot 10^4$

$$\frac{\zeta}{\zeta_{нач}} = 0,9959 \cdot e^{-0,0219 \cdot t},$$

$$\frac{q}{q_{нач}} = 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1,17 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1,022;$$

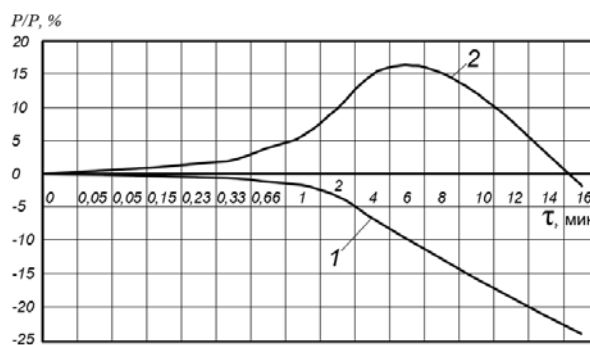
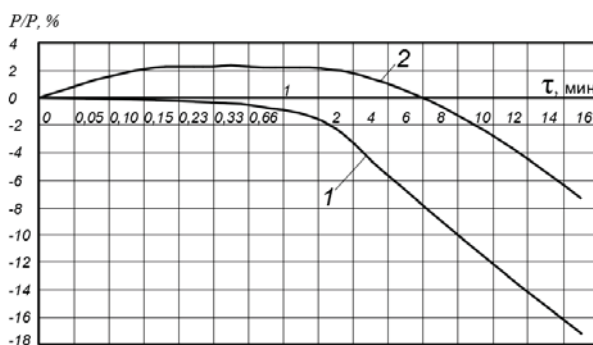
при  $Re_{cp} 4,5 \cdot 10^4$

$$\frac{\zeta}{\zeta_{нач}} = 0,9363 \cdot e^{-0,032 \cdot t},$$

$$\frac{q}{q_{нач}} = -2,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 + 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 8,06 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,9842.$$

Введя полученные зависимости в математическую модель рекуперативного теплообменника, получим модель теплообмена в условиях образования инея.

На рисунке 2 а, б приведены сравнительные графики изменения тепловой мощности аппарата в условиях образования инея.



а

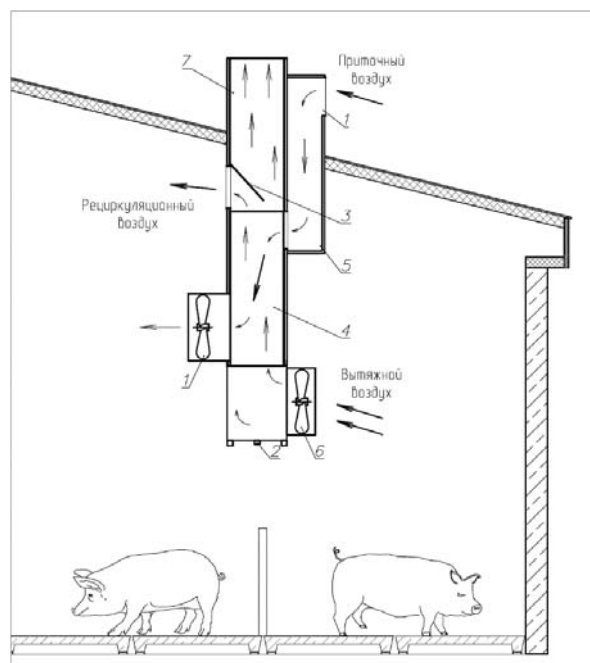
б

**Рис. 2. Зависимости коэффициентов относительной тепловой мощности от продолжительности процесса десублимации: а, б – при  $Re_{cr}$   $2,2 \cdot 10^4$  и  $4,5 \cdot 10^4$  соответственно; 1 – относительное измерение тепловой мощности рекуператора в модели, воспринимающей иней исключительно как источник термического и аэродинамического сопротивления; 2 – учитывает реальный характер влияния процесса образования инея на теплопередачу**

Характер кривых отчетливо демонстрирует изначальное наращивание относительной тепловой мощности (восходящая фаза), причем при  $Re_{cr} 2,2 \cdot 10^4$  (рис. 2 а) это происходит скачкообразно, в течение нескольких первых секунд процесса десублимации. Далее кривая выходит на плато, а затем происходит плавное монотонное, практически линейное снижение относительной тепловой мощности (нисходящая фаза). Таким образом, в течение первых десяти минут процесса инееобразования, несмотря на уменьшение пропускной способности рекуператора, тепловая мощность стабильно близка к номинальным значениям – имеет место выраженный квазистационарный режим.

Под действием гравитации жидкость стекает в поддон и удаляется конденсатоотводчиком 2 в систему навозной канализации.

С ростом критерия Рейнольдса до  $4,5 \cdot 10^4$  (рис. 2 б) интенсивность теплопередачи возрастает и приобретает выраженную восходящую фазу экспоненциального характера с экстремумом 16%, соответствующим шести минутам с начала процесса. Выявленного горизонтального участка (плато) нет. Его можно условно расположить близ экстремума в интервале 4-8 мин. Последующая нисходящая фаза демонстрирует монотонное убывание с характером, близким к линейному.



Описанное выше свидетельствует, что образование инея сопровождается рядом положительных эффектов. Для их использования предлагается способ регулирования приточно-вытяжной теплообменной установкой с обеспечением максимальной эффективности утилизации теплоты (рис. 3).

**Рис. 3. Рекуперативный утилизатор**

**теплоты вытяжного воздуха:**

- 1 – приточный вентилятор;
- 2 – конденсатоотводчик;
- 3 – рециркуляционная заслонка;
- 4 – теплообменник;
- 5 – приточный воздуховод;
- 6 – вытяжной вентилятор;
- 7 – выпускной воздуховод

Фазовый переход воды из газообразного в жидкое состояние предполагает выделение теплоты парообразования, что является дополнительным источником тепловой энергии и положительно сказывается на нагреве приточного воздуха. Помимо теплового, следует также выделить и моющий эффект конденсата. При охлаждении теплого и влажного вытяжного воздуха ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 70\%$ ) до  $0^{\circ}\text{C}$  образуется 6,5 г влаги, приходящиеся на каждый килограмм сухого воздуха. Учитывая плотность воздуха и производительность рассматриваемого аппарата ( $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), каждый час выделяется приблизительно 32500 г конденсата, омывающих теплообменные поверхности.

При охлаждении поверхности теплообмена ниже нуля градусов Цельсия начинается кристаллизация конденсата. Важно отметить, что образующийся слой не является льдом, на теплообменной поверхности зарождаются и развиваются дендриты. Процесс сопровождается образованием кристаллов первого порядка – вытянутых, перпендикулярных поверхности теплообмена, кристаллов второго порядка – перпендикулярных первому, и т.д. Процессу сопутствует освобождение теплоты льдообразования. Если температура теплообменной поверхности близка к нулю, процесс может принять циклический характер: кристаллизация – плавление. Такое течение процесса нарушает изначальную структуру инея и образует плотный, подобный льду слой.

При постоянстве расхода вытяжного воздуха можно установить динамическое равновесие, реализуемое регулированием расхода приточного воздуха пропорционально снижению наружной температуры.

Вытяжной вентилятор работает с постоянным расходом, приточный воздух поступает в меньшем количестве, это приводит к формированию разрежения в производственном помещении. Под действием образовавшегося перепада давлений усиливается инфильтрация наружного воздуха, из-за дополнительного сопротивления снижается производительность вытяжного вентилятора – система стабилизируется в режиме, отличном от ожидаемого. Для устранения этого явления предусмотрена рециркуляционная заслонка 8, которая открывается пропорционально снижению расхода приточной системы и направляет часть вытяжного воздуха обратно в помещение.

### Выводы

Учет влияния инеобразования на интенсивность теплопередачи позволяет провести более точную оценку тепловых потоков, что невозможно в упрощенной модели, рассчитать период эффективного использования рекуператора в заданном температурно-влажностном режиме, а следовательно, определить оптимальное время включения теплообменника в режим оттаивания. Критерием оптимальности удобно принять относительную тепловую мощность. Уменьшение тепловой мощности ниже номинального значения сопровождается значениями коэффициента относительной тепловой мощности меньше единицы.

Одним из путей использования увеличения теплопередачи в условиях образования инея является

реализация алгоритма динамического регулирования системы рекуперации теплоты с условием обеспечения максимальной тепловой мощности аппарата. Такое решение предполагает изменение параметров работы исполнительных механизмов аппарата в режиме реального времени с целью обеспечения максимально возможной тепловой мощности.

### Библиографический список

1. Гулевский В.А., Шацкий В.П. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. С. 140-144.
2. Кирсанов В.В., Мурусидзе Д.Н., Некрашевич В.Ф., Шевцов В.В., Филонов Р.Ф. Механизация и технология животноводства: Учебник. М., 2013. 585 с.
3. Гулевский В.А., Шацкий В.П., Спирина Н.Г. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микроклимата животноводческих помещений // Известия ВУЗов. Строительство. № 9. Новосибирск, 2013. С. 64-68.
4. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Эффективное животноводство. 2011. № 5. С. 30-31.
5. Архипцев А.В., Игнаткин И.Ю. Автоматизированная система микроклимата с утилизацией теплоты вытяжного воздуха // Вестник НГИЭИ. 2016. № 4 (59). С. 5-14.
6. Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. Система микроклимата в свиноводстве с применением охладителей новой конструкции // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 5. С. 18-20.
7. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Энергоэффективная автоматизированная система микроклимата // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 6 (76). С. 48-51.
8. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Математическая модель водоиспарительного охлаждения в системах вентиляции // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 7 (77). С. 14-20.
9. Игнаткин И.Ю., Бондарев А.М., Курячий М.Г., Путан А.А., Архипцев А.В. Опыт внедрения системы рекуперации тепла вентиляционного воздуха в систему поддержания микроклимата в свиноматнике ООО «Фирма Мортадель» // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4 (9). С. 256-261.
10. Тихомиров Д.А. Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения основных технологических процессов в животноводстве: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2015.
11. Кононенко А.С., Киселев Р.В. Восстановление радиаторов // Сельский механизатор. 2004. № 6. С. 22-23.
12. Игнаткин И.Ю. Оценка эффективности рекуперации теплоты в свиноматнике-откормочнике ООО «Фирма Мортадель» // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 1 (71). С. 14-20.
13. Напалков Г.Н. Тепломассоперенос в условиях образования инея. М.: Машиностроение, 1983. 189 с.

Статья поступила 04.05.2017

## METHOD OF INCREASING HEAT RECOVERY EFFICIENCY IN CONDITIONS OF FROST FORMATION

**VLADIMIR V. KIRSANOV**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

E-mail: kirvv2014@mail.ru

**IVAN Yu. IGNATKIN**, Phd (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, bld.1

Microclimate making is an important and energy-intensive task. About 80% of the heat used for heating production premises is removed through a ventilation system. In animal husbandry, it is rather expedient to utilize the exhaust air heat in an air-to-air recuperative heat exchanger. When a heat exchanger wall is cooled to temperatures below zero, the condensate crystallization process starts from the side of the exhaust duct. Therefore, it is advisable to take into account frost formation. The frost properties differ from those of snow. When frost is formed, two groups of processes develop simultaneously: both those increasing and decreasing heat transfer. The authors have obtained approximate dependences to determine the coefficients of relative heat transfer and relative resistance to the process duration, as well as determined dependences of the change in relative thermal power over time. It has been noted that a fluid flow mode has a significant effect on the efficiency of heat and mass transfer. In this case, the general nature of the process can be traced: an initial increase in the relative thermal power is followed by a quasi-stationary mode, and then relative thermal power decreases. The maximum efficiency of heat utilization is ensured in a quasi-stationary mode. Accounting for the effect of frost formation on heat transfer intensity one can make a more accurate estimate of heat flows, determine the optimum time for switching the heat exchanger into a defrosting mode, and implement a dynamic control algorithm for a heat recovery system to ensure maximum heat output of an installation.

**Key words:** ventilation, desublimation, frost formation, quasi-stationary mode, microclimate, heat recovery, microclimate system, heat exchange, heat transfer, heat utilization, energy saving.

### References

1. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P. Modelirovaniye teploobmena v plastinchatykh teploobmennikakh [Modeling of heat exchange in plate heat exchangers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. Pp. 140-144. (In Rus.)
2. Kirsanov V.V., Murusidze D.N., Nekrashevich V.F., Shevtsov V.V., Filonov R.F. Mekhanizatsiya i tekhnologiya zhivotnovodstva: Uchebnyk [Livestock breeding mechanization and technology: Study manual]. Moscow, 2013, 585 p. (In Rus.)
3. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P., Spirina N.G. Primeneniye teploobmennikov (rekuperatorov) dlya normalizatsii mikroklimata zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [Application of heat exchangers (recuperators) for microclimate control on livestock farms]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*, № 9. Novosibirsk, 2013. Pp. 64-68. (In Rus.)
4. Il'in I.V., Ignatkin I. Yu., Kuryachiy M.G. Vliyaniye parametrov mikroklimata na produktivnost' sviney [Effect of microclimate parameters on swine production]. *Effektivnoye zhivotnovodstvo*, 2011, No. 5. Pp. 30-31. (In Rus.)
5. Arkhiptsev A.V., Ignatkin I. Yu. Avtomatizirovannaya sistema mikroklimata s utilizatsiyey teploty vyzhnogo vozdukh [Automated system of microclimate with utilization of exhaust air heat]. *Vestnik NGIEI*, 2016, No. 4 (59). Pp. 5-14. (In Rus.)
6. Kazantsev S.P., Ignatkin I. Yu. Sistema mikroklimata v svinovodstve s primeneniyyem okhladiteley novoy konstruktssii [Microclimate system in swine production with the use of new coolers]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 2014, No. 5. Pp. 18-20. (In Rus.)
7. Kirsanov V.V., Ignatkin I. Yu. Energoeffektivnaya avtomatizirovannaya sistema mikroklimata [Energy-efficient automated microclimate system]. *Vestnik FGOU VPO "MGAU imeni V.P. Goryachkina"*, 2016, No. 6 (76). Pp. 48-51. (In Rus.)
8. Kirsanov V.V., Ignatkin I. Yu. Matematicheskaya model' vodoisparitel'nogo okhlazhdeniya v sistemakh ventilyatsii [Mathematical model of water-evaporative cooling in ventilation systems]. *Vestnik FGOU VPO "MGAU imeni V.P. Goryachkina"*, 2016, No. 7 (77). Pp. 14-20. (In Rus.)
9. Ignatkin I. Yu., Bondarev A.M., Kuryachiy M.G., Putan A.A., Arkhiptsev A.V. Opyt vnedreniya sistemy rekuperatsii tepla ventilyatsionnogo vozdukh v sistemu podderzhaniya mikroklimata v svinnarnike OOO "Firma Mortadel'" [Experience of introducing the system of heat

recovery of ventilation air into the microclimate control system on a swine farm of LLC "Firma Mortadel"]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2014, No. 4 (9). Pp. 256-261. (In Rus.)

10. Tikhomirov D.A. Energoberegayushchiye elektricheskiye sistemy i tekhnicheskiye sredstva teploobespecheniya osnovnykh tekhnologicheskikh protsessov v zhivotnovodstve [Energy-saving electrical systems and technical means of heat supply of basic technological processes in animal husbandry]: DSc (Eng) thesis. Moscow, 2015. (In Rus.)

11. Kononenko A.S., Kiselev R.V. Vosstanovleniye radiatorov [Restoration of radiators]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2004, No. 6. Pp. 22-23. (In Rus.)

12. Ignatkin I.Yu. Otsenka effektivnosti rekuperatsii teploty v svinarnike-otkormochnike ООО "Firma Mortadel" [Evaluation of the heat recovery efficiency on a swine-breeding farm of LLC "Firma Mortadel"]. *Vestnik FGOU VPO "MGAU imeni V.P. Goryachkina"*, 2016, No. 1 (71). Pp. 14-20. (In Rus.)

13. Napalkov G.N. Teplomassoperenos v usloviyakh obrazovaniya ineya [Heat and mass transfer in conditions of frost formation]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983, 189 p. (In Rus.)

Received on May 4, 2017

УДК 631.33.004.68

**ИСАЕВ АЙДЫН ЮНИС ОГЛЫ**, докт. философии по технике, доцент

E-mail: aydin.isayev.75@mail.ru

Азербайджанский государственный аграрный университет, проспект Ататюрка, 262, Гянджа, AZ 2000, Азербайджанская Республика

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРЯМОГО ПОСЕВА

Отмечаются преимущества нулевой обработки почвы и важность оценки качества посева при прямом посеве. Ставится цель обосновать условия качественного расположения семян в поле на основе математической модели процесса. Рассматриваются несколько моделей процесса расположения семян в рядке. Построена графическая зависимость, характеризующая коэффициент вариации интервалов между растениями в зависимости от полевой всхожести семян при разной точности посева. Вариант идеальной точности посева, т.е. имеющий наилучший результат, может служить оценочным при выборе существующей или при проектировании новой техники. Представлены формулы, описывающие интервалы между семенами. Установлено, что у последовательностей семян в рядке и у моделей этих последовательностей свойства автокорреляционных функций и спектров хорошо согласуются. Полученные формулы, описывающие интервал между семенами, позволяют на основе вероятности посева семян аппаратом определить вероятностные характеристики интервалов между семенами при работе посевной машины прямого посева. У последовательностей семян в рядке и у моделей этих последовательностей свойства автокорреляционных функций и спектров хорошо согласуются. У последовательностей растений в рядке и у рассмотренных моделей этих последовательностей свойства автокорреляционных функций и спектров не одинаковы. В то же время единственное различие этих последовательностей – наличие не взшедших семян, а единственное дополнительное ограничение, к которому прибегли при составлении модели рядка растений, – постоянство величины полевой всхожести.

**Ключевые слова:** посев, качество посева, посевная машина, всхожесть, вероятностная модель, коэффициент вариации, плотность вероятности.

**Введение.** Обработка почвы является одним из основных элементов системы земледелия. Создание оптимальной структуры почвы, благоприятные условия для посева, водного, воздушного и пищевого режимов всегда были ее наиболее важными задачами.

Традиционная система земледелия с использованием плуга, который полностью переворачивает почву и сильно ее рыхлит, вызывает раз-

рушение структуры почвы. Она становится менее плодородной вследствие удаления соломы или ее сжигания и заделывания растительных остатков глубоко в почву, а также гибели агрономически полезной макро- и мезофауны почвы, микроорганизмов. Интенсивная обработка почвы оказывает отрицательное воздействие на качество почвы, ее водное и воздушное содержание, а также на климат и ландшафты.