ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-30

TECHNOLOGICAL FUNCTIONS OF A TECHNICAL SYSTEM FOR REGULATING THE HYDROTHERMAL REGIME OF AGROPHYTOCENOSIS AND INTEGRATED CROP PROTECTION FROM CLIMATIC RISKS

V. V. Borodychev, M. N. Lytov

*Federal State Budget Science Center «All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics
and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova»*

Received 17.12.2019

Submitted 25.05.2020

Summary

The technological functions of a hypothetical technical system for the integrated regulation of the hydrothermal regime of agrophytocenosis and the protection of crops from climatic risks based on irrigation and drainage are considered. Functions are formalized in mathematical form, criteria and optimization parameters are indicated.

Abstract

Introduction. The creation of new technical systems in the field of irrigation and drainage with expanded functionality for the integrated regulation of the hydrothermal regime of agrophytocenosis and the protection of crops from climatic risks is an urgent task of modern reclamation science. The potential of new technologies based on the use of the capabilities of such technical systems is determined by the expanded tools for the integrated regulation of life factors, optimization of the hydrothermal regime, compensation of the harmful effects of frost, air droughts, and a number of other meteorological phenomena critical for crops. The purpose of this study at this stage is to develop a system and formalize the functions of a technical system for regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis. **Object.** The object of research is a technical system that provides the ability to comprehensively control the hydrothermal regime of agrophytocenosis and the protection of crops from climatic risks. **Materials and methods.** The considered set of technological functions involves the regulation of various aspects and factors of plant life in a natural agrometeorological environment. The description of the functions is carried out on the basis of those considerations that the operation of the regulator at some given moment in time is realized in a specific environment with the generated heat transfer parameters. Heat transfer in such an idealized environmental environment between the system components under consideration can be considered established. Consequently, the action of the regulator can be considered a disturbing moment, which simultaneously changes the energy of the system exactly by the value introduced into it. This approach allows us not to consider the whole variety of mass and heat transfer processes formed relative to the agrophytocenosis system, but to determine the technological function by the energy demand (consumed or diverted) necessary to achieve any target indicators. **Results and conclusions.** The concept of a technical system for regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis and the integrated protection of crops from climatic risks involves the implementation of a number of regulators, which can and should be considered as its technological functions. Such functions are: regulation of the water regime of the soil; regulation of the temperature regime of the soil, including compensation for excessive temperature stress and protection against critical temperature drops during frosts; temperature control of vegetative organs, both in the case of optimization of the thermal regime, and in the case of protecting plants from frost; microclimate control of crops. Functions, as a rule, have a complex implementation, with simultaneous regulation of several parameters of the hydrothermal regime of agrophytocenosis at once. Studies have proposed a formalized description of the above technological functions; functions are given in mathematical form, criteria and optimization parameters are indicated. The function of regulating the water regime of the soil is considered as a classic task of irrigation and drainage technologies, the essence of which is to create biologically sound conditions for the water supply of agricultural plants by means of a directed change in the soil moisture content. The function of controlling the temperature of the soil has two areas of determination, in terms of warming the root layer and compensating for excessive temperature tension. The function of regulating the temperature of vegeta-

tive organs involves compensating for the temperature stress of plants with an ambient temperature that is obviously greater than the biologically justified range, or critical temperature drops (frosts) due to the transfer of heat from drip-sprayed moisture. The control of the microclimate of the sowing involves the implementation of two more functions of the technical system, the functions of regulating air temperature and the functions of regulating air humidity in the sowing environment. The functions are formalized taking into account the well-known laws of heat and mass transfer, considered in relation to crops of crops. The use of functions in a formalized form allows you to specify, including at a quantitative level, the requirements for the technical system, designs, priorities for the combination of various technologies.

Key words: *hydrothermal mode, technical system, technological functions, formalized description of regulators.*

Citation. Borodychev V.V., Lytov M.N. Technological functions of a technical system for regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis and integrated crop protection from climatic risks. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 2(58). 307-319 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-30.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.67:581.55

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА АГРОФИТОЦЕНОЗА И КОМПЛЕКСНОЙ ПРОТЕКЦИИ ПОСЕВОВ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ

В. В. Бородычев, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН

М. Н. Лытов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский
институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова

Дата поступления в редакцию 17.12.2019

Дата принятия к печати 25.05.2020

Актуальность. Создание новых технических систем в области гидромелиорации с расширенным функционалом для комплексного регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и протекции посевов от климатических рисков является актуальной задачей современной мелиоративной науки. Потенциал новых технологий, базирующихся на использовании возможностей таких технических систем, определяется расширенным инструментарием комплексного регулирования факторов жизни, оптимизации гидротермического режима, компенсации губительного влияния заморозков, воздушных засух и ряда других, критических для сельскохозяйственных культур, метеорологических явлений. Целью настоящего исследования на данном этапе является разработка системы и формализации функций технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза. **Объект.** Объектом исследований является техническая система, обеспечивающая возможность комплексного регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и протекции посевов от климатических рисков. **Материалы и методы.** Рассматриваемая совокупность технологических функций предполагает регулирование различных аспектов и факторов жизни растений в естественном агрометеорологическом окружении. Описание функций выполняется исходя из тех соображений, что работа регулятора на какой-то заданный момент времени реализуется в определенном средовом окружении со сформированными параметрами теплообмена. Теплообмен в таком идеализированном средовом окружении между рассматриваемыми компонентами системы можно считать устоявшимся. Следовательно, действие регулятора можно считать возмущающим моментом, одновременно изменяющим энергию системы ровно на привносимую в нее величину. Такой подход позволяет не рассматривать все многообразие процессов массо- и теплообмена формирующихся относительно системы агрофитоценоза, но определять технологическую функцию потребностью в энергии (потребляемой или отводимой), необходимой для достижения

каких-либо целевых показателей. **Результаты и выводы.** Концепт технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и комплексной протекции посевов от климатических рисков предполагает реализацию целого ряда регуляторов, которые можно и следует рассматривать в качестве ее технологических функций. Такими функциями являются регулирование водного режима почвы; регулирование температурного режима почвы, в том числе – компенсация избыточной температурной напряженности и защита от критических понижений температуры при заморозках; регулирование температуры вегетативных органов как в случае оптимизации теплового режима, так и в случае защиты растений от заморозков; регулирование микроклимата посева. Функции, как правило, имеют комплексную реализацию с одновременным регулированием сразу нескольких параметров гидротермического режима агрофитоценоза. Исследованиями предложено формализованное описание обозначенных выше технологических функций; функции заданы в математической форме, обозначены критерии и параметры оптимизации. Функция регулирования водного режима почвы рассматривается как классическая задача гидромелиоративных технологий, сущность которой заключается в создании биологически обоснованных условий водного питания сельскохозяйственных растений путем направленного изменения содержания почвенной влаги. Функция регулирования температуры почвы имеет две области определения, - в плане утепления корнеобитаемого слоя и компенсации избыточной температурной напряженности. Функция регулирования температуры вегетативных органов предполагает компенсацию температурного стресса растений с температурой окружающей среды заведомо больше биологически обоснованного диапазона, либо критических понижений температуры (заморозков) за счет передачи тепла капельно-распыляемой влаги. Управление микроклиматом посева предполагает реализацию еще двух функций технической системы: функции регулирования температуры воздуха и функции регулирования влажности воздуха в среде посева. Функции формализованы с учетом известных законов тепло- и массообмена, рассматриваемых применительно к посевам сельскохозяйственных культур. Использование функций в формализованном виде позволяет конкретизировать, в том числе на количественном уровне, требования к технической системе, конструкциям, приоритетам по комбинации различных технологий.

Ключевые слова: гидротермические режимы агрофитоценозов, регулирование гидротермических режимов, защита посевов, климатические риски.

Цитирование. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Технологические функции технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и комплексной протекции посевов от климатических рисков. *Известия НВ АУК.* 2020. 2(58). 307-319. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-30.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Одним из перспективных современных трендов развития гидромелиоративных технологий является расширение функциональности технических систем, на основе которых эти технологии реализуются. Гидротехнические мелиорации остаются одними из наиболее ресурсоемких технологических комплексов, применяемых при возделывании сельскохозяйственных культур. Гидромелиоративные технологии требуют капитального обустройства территории, включая планирование участков, создание водопроводящей сети и системы гидротехнических сооружений, материалоемких технических комплексов, работающих непосредственно на мелиорированных участках разветвленной системы мониторинга и управления и т.д. Однако высокая «цена» гидромелиоративных технологий в полной мере окупается возможностью повышения (до 5 и более раз в сельскохозяйственных зонах с неблагоприятными агроклиматическими условиями) продуктивности сельскохозяйственных культур, обеспечением гарантированного урожая и продовольственной безопасности регионов [3, 5, 6, 10, 12, 13, 14]. Современные гидромелиоративные

технологии уже многое «умеют» и, помимо основной технологической функции, регулирования водного режима почвы, используются для проведения подкормок минеральными удобрениями, химических прополок. В системе интегрированной защиты растений от болезней и вредителей предложены способы компенсации избыточной температурной напряженности в среде растений, а также утепления почв и грунтов под сельскохозяйственными посевами [2, 4, 8, 11, 15]. Часто эти технологии имеют различную техническую реализацию [1, 9]. Сегодня задача состоит в создании единого технического концепта, обеспечивающего на базе гидромелиоративных технологий комплексную реализацию самых разных технологических функций. Целью настоящего исследования является разработка системы и формализация функций технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и комплексной протекции посевов сельскохозяйственных культур от климатических рисков.

Материалы и методы. Управление гидротермическим режимом агрофитоценоза рассматривается как совокупность технологий и технических средств, способных оказывать существенное, физически обоснованное влияние на водное состояние растений и микроклимат посева [1, 7, 11, 15]. Агрофитоценоз как искусственно организованное сообщество растений преимущественно культурного происхождения является составной частью более высокоуровневых систем. Техническая система как фактор формирования гидротермического режима агрофитоценоза является функциональным компонентом одной из таких высокоуровневых систем. Конструктивный концепт для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в этом плане должен органично встраиваться в эту биотехническую систему; это требование является одним из основополагающих для создания единого концепта.

Концепт технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и комплексной протекции посевов от климатических рисков определяется заданием совокупности ключевых характеристических параметров, в первую очередь качественного плана. Одной из таких важнейших характеристик технической системы является совокупность технологических функций, выполнение которых должно быть присуще системе на уровне регулятора. При этом рассматриваемая совокупность технологических функций предполагает регулирование различных аспектов и факторов жизни растений в естественном агрометеорологическом окружении.

Описание функций выполняется исходя из тех соображений, что работа регулятора на какой-то заданный момент времени реализуется в определенном средовом окружении со сформированными параметрами теплообмена. Параметры эти, безусловно, не постоянны, но для конкретной метеорологической ситуации имеют относительно узкий диапазон определений, который в приближении может характеризоваться средним значением. Рассматриваемая «метеорологическая ситуация» характеризуется продолжительностью, заведомо большей (или как минимум – не меньшей) продолжительности технологического цикла регулятора. Теплообмен в таком идеализированном средовом окружении между рассматриваемыми компонентами системы можно считать устоявшимся. А, следовательно, действие регулятора можно считать возмущающим моментом, единовременно изменяющим энергию системы ровно на величину привносимой энергии. В последующем система стремится вернуться к исходному состоянию, обусловленному сформированными параметрами средового окружения. Время между пиком возмущающего действия регулятора и вернувшейся к исходному состоянию системы определяет продолжительность совокупного действия регулятора. Такой подход позволяет не рассматривать все многообразие процессов массо- и теплообмена формирующихся относительно системы агрофитоценоза, но определять технологическую функцию потребностью в энергии (потребляемой или отводимой), необходимой для достижения каких-либо целевых показателей.

Результаты и обсуждение. Концепт технической системы для регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и комплексной протекции посевов от климатических рисков предполагает реализацию целого ряда регуляторов, которые можно рассматривать в качестве ее технологических функций. Для осуществления поставленных задач при использовании в качестве основного регуляторного инструмента оросительной воды техническая система должна обеспечивать:

- регулирование водного режима почвы;
- регулирование температурного режима почвы. Предполагается технологическая реализуемость как снижения температуры почвы, так и ее повышения в период длительных заморозков или критических для биологии возделываемой культуры понижений температуры;
- регулирование температуры вегетативных органов. В рамках этого направления также решаются две, концептуально отличающиеся задачи: компенсация избыточной температурной напряженности и протекция климатических рисков в период заморозков;
- регулирование температуры воздуха как важнейшей составляющей микроклимата посева;
- регулирование относительной влажности воздуха в среде посева.

В ряде случаев функции эти реализуются одновременно при использовании одного из способов подачи воды на мелиорируемый участок. Некоторые из функций являются аспектами (сторонами) одного физического процесса. Например, в результате испарения капель воды с поверхности вегетативных органов осуществляется отвод тепла в контактной зоне, и одновременно задействуются регуляторы микроклимата, температуры и влажности воздуха в среде посева. Как в этом случае действует тот или иной регулятор, насколько он перекрывает технологические требования и, собственно, каковы эти требования, можно спрогнозировать лишь на основе формализации технологических функций. Рассмотрим возможности формализованного описания каждой из обозначенных выше технологических функций.

Регулирование водного режима почвы является одной из классических функций гидротехнических мелиораций, заключающейся в создании биологически обоснованных условий водного питания сельскохозяйственных растений путем направленного изменения содержания почвенной влаги. Функция для мелиорированных земель с автоморфным типом почвообразования имеет следующее выражение:

$$F(W_{SR}) = (W_{MS} + \Delta W_R) \in W_{b.min} < W_{SR} < W_{b.max}, \quad (1)$$

где $F(W_{SR})$ – функция регулятора технической системы применительно к водному режиму почвы под посевами сельскохозяйственной культуры, W_{MS} – метеорологически обеспеченная почвенная влага, мм; ΔW_R – объем влаги, поставляемый регулятором (технической системой), мм; $W_{b.min}$ – видоспецифичный минимум биологически обоснованного диапазона содержания почвенной влаги, мм; $W_{b.max}$ – видоспецифичный максимум биологически обоснованного диапазона содержания почвенной влаги, мм.

Отсюда:

$$\Delta W_R = W_{SR} \in (W_{b.min} < W_{SR} < W_{b.max}) - W_{MS},$$

или

$$\Delta W_R = (W_{b.max} - W_{b.min}) - W_{MS}.$$

Задача регуляторной функции технической системы в этом случае заключается в создании благоприятного водного режима почвы, когда содержание почвенной влаги не выходит за пределы биологически обоснованного диапазона.

Другой важной технологической функцией технической системы является регулирование температуры почвы. Функция определяется на двух отрезках с технологически различающейся реализацией. При этом в первом случае предполагается утепление корнеобитаемого слоя почвогрунта за счет проведения поливов водой, температура которой в определенной степени выше биологического минимума температуры для корневой системы сельскохозяйственных культур. На данном отрезке функция определяется следующим:

$$F(\Delta T_S) = \frac{\Delta q_S}{C_S \cdot V_S}, \quad (2)$$

$$\Delta q_S = \Delta q_W = (T_W - T_{S.trg.}) \cdot C_W \cdot V_W,$$

$$V_W \leq V_S \cdot (\beta_{V.HB} - \beta_{V.i}), T_W < T_{W.max},$$

где $F(\Delta T_S)$ – функция регулятора технической системы применительно к температурному режиму почвы в зоне размещения корней сельскохозяйственной культуры, ΔT_S – требуемая величина прогрева почвы, 0С; Δq_S – количество теплоты, необходимое для прогрева заданного объема почвы на величину ΔT_S , Дж; C_S – средняя для расчетного слоя объемная теплоемкость почвы, определяемая с учетом содержания почвенной влаги, Дж/м³·0С; V_S – расчетный объем почвы, для которого требуется проведение тепловых мелиораций, м³/га; T_W – расчетная технологическая температура воды, используемой для проведения тепловых мелиораций, 0С; $T_{S.trg.}$ – целевая, агробиологически обоснованная температура почвы, для приведения к которой проводятся тепловые мелиорации, 0С; C_W – объемная теплоемкость воды, Дж/м³·0С; V_W – технологический объем воды, используемой для проведения тепловых мелиораций, м³/га; $\beta_{V.HB}$ – объемное содержание влаги в почве в состоянии наименьшей влагоемкости, %; $\beta_{V.i}$ – текущее фактическое значение объемной влажности почвы, %; $T_{W.max}$ – биологически обоснованное, пороговое значение технологической температуры воды, используемой для проведения тепловых мелиораций, 0С.

Приведенная система уравнений определяет, собственно, технологическую функцию, позволяет количественно оценить параметры ее реализации, определяет совокупность ограничений, в рамках которых выполняется эта функция. Одним из основных положений, используемых при математическом описании функции, является равенство по количеству теплоты, требуемого для повышения температуры расчетного объема почвы на заданную величину и поставляемого теплоносителем, – оросительной водой. Приравнивание этих величин позволяет оценить все технологические параметры, в том числе такие, как потребный объем теплоносителя и его температуры. Температура почвы и почвенного раствора возрастает при инфильтрации теплой воды с поверхности к корнеобитаемому слою почвы. При этом целесообразно, чтобы функция выполнялась вкуче и не в ущерб основной технологической функции – регулирования водного режима почвы. Отсюда ограничение по объему воды, используемой для проведения тепловых мелиораций. Другое ограничение определяет предельную температуру теплоносителя, оросительной воды, используемой для проведения тепловых мелиораций.

Во втором случае функция предполагает компенсацию температурной напряженности почвы при ее подъеме выше максимума биологически обоснованного диапазона температур. Температура воды при этом должна быть ниже этого, биологически обоснованного, максимума, но в случае проведения объемных поливов (с активной инфильтрацией в границах корнеобитаемого слоя почвы), – еще и выше минимума биологически обоснованного диапазона температур почвы:

$$F(-\Delta T_S) = \frac{-\Delta q_S}{C_S \cdot V_S}, \quad (3)$$

$$-\Delta q_S = -\Delta q_W = (T_W - T_{S.trg.}) \cdot C_W \cdot V_W,$$

$$V_W \leq V_S \cdot (\beta_{V.HB} - \beta_{V.i}),$$

$$T_{W.min} < T_W < T_{W.max},$$

где $T_{W.min}$ – биологически обоснованный, нижний порог технологической температуры воды, используемой для проведения тепловых мелиораций, 0С.

Последнее требование снимается при реализации технологии в формате освежительных поливов, предполагающих смачивание только поверхности почвы, без инфильтрации влаги в корнеобитаемый горизонт. В этом случае поливы водой с температурой ниже биологически обоснованного минимума более эффективно снижают температуру почвы, однако отрицательного влияния на корневую систему растений не оказывают: $T_W < T_{W.min}$. Технология предполагает существенное ограничение по объему теплоносителя, из расчета увлажнения поверхности почвы не более чем на 0,01-0,03 м ($V_{S/га} \cong 10 \div 30$ м³/га).

Еще одной функцией технической системы, реализуемой в рамках разрабатываемого концепта, является регулирование температуры вегетативных органов растений. Технология реализуется, преимущественно, посредством распыления капельно-жидкостной влаги на поверхность вегетативных органов растений, в первую очередь, – листьев. Как и в предыдущем случае, технологическая функция имеет два вектора определения. Первый предполагает компенсацию температурного стресса растений с температурой окружающей среды заведомо больше биологически обоснованного (физиологически оптимального) диапазона. Функция в этом случае предполагает отвод тепла от вегетативных органов растений посредством теплообмена листьев с капельной влагой и последующего испарения последней с поглощением теплоты фазового перехода.

$$F(-\Delta T_v) = \frac{-\Delta q_v}{C_v \cdot V_v}, -\Delta T_v > T_{v.max} - T_{v.actual} \quad (4)$$

$$-\Delta q_v = -\Delta q_{dm} = -q'_{ph.t} \cdot \Delta t \pm q'_{cht} \cdot \Delta t,$$

$$-q_{ph.t} = -e \cdot r, e = \frac{\Delta V_W}{\Delta t \cdot r_a}, \Delta V_W \leq f(\max_{dm \in S_v} V_W),$$

где $-\Delta T_v$ – изменение температуры вегетативных органов растений в результате отвода тепла посредством испарения капельно-жидкостных форм распыленной влаги, 0С; $-\Delta q_v$ – количество теплоты, отводимое от вегетативных органов растений посредством испарения капельно-жидкостных форм распыленной влаги в пересчете на гектар посевной площади, Дж/га; C_v – средняя объемная теплоемкость вегетативных органов, Дж/м³·0С; V_v – суммарный объем вегетативных органов растений, на регулирование температуры которых направлена технология, м³/га; $T_{v.max}$ – верхняя граница биологически обоснованного диапазона температур вегетативных органов растений, 0С; $T_{v.actual}$ – актуальная (действительная) температура вегетативных органов, 0С; $-\Delta q_{dm}$ – количество теплоты, теряемое в суммарном объеме капельной влаги в результате тепло-массообменных процессов с окружающей газовой средой, Дж/га; $-q'_{ph.t}$ – поток тепла, формируемый в процессе испарения капельно-жидкостных форм влаги (тепло-массообмен, направлен от жидкости в сторону газовой среды), Дж/га·с; q'_{cht} – поток тепла, формируемый в результате контактного теплообмена между газовой средой и капельно-жидкостными формами влаги, Дж/га·с; e – динамика испарения капельно-жидкостных форм влаги с поверхности вегетативных органов растений, м³/га·с; r – теплота фазового перехода воды (парообразования), Дж/кг; ΔV_W – суммарный объем капельно-жидкостных форм влаги на гектаре посевной площади, м³/га; Δt – суммарная продолжительность периода испарения капельной влаги с поверхности вегетативных органов растений, с; функция $f(\max_{dm \in S_v} V_W)$ характеризует ограничение объема капельной влаги условиями удержания на поверхности вегетативных органов растений без скатывания.

Результатом регуляторной функции технической системы является снижение температуры вегетативных органов растений ($-\Delta T_v$). Предполагается, что отвод тепла $-\Delta q_v$ от вегетативных органов растений равен потерям тепла в суммарном объеме капельной влаги в результате тепло-массообменных процессов с окружающей газовой средой ($-\Delta q_{dm}$). В свою очередь, потери тепла в суммарном объеме капельной влаги являются результирующим двух процессов: потока тепла, формируемого в процессе испарения капельно-жидкостных форм влаги, и контактным теплообменом между газовой средой и капельной влагой на поверхности вегетативных органов. При этом если поток тепла в результате испарения капельной влаги всегда направлен от жидкости к газовой среде, то контактный теплообмен определяется разницей температур между средами. Функция имеет также технологическое ограничение объема разово распыляемой капельной влаги условиями удержания на поверхности вегетативных органов растений без скатывания.

Второй вектор функции предполагает компенсацию критических (с точки зрения биологии культуры) понижений температуры (заморозков) за счет передачи тепла капельно-распыляемой влаги растениям:

$$F(\Delta T_v) = \frac{\Delta q_v}{C_v \cdot V_v}, \Delta T_v > T_{v.min} - T_{v.actual}, \quad (5)$$

$$\Delta q_v = \Delta q_{dm} = V_{dm} \cdot C_w + k_{snow} \cdot V_{dm} \cdot \rho \cdot r_{snow},$$

$$V_{w.snow} \cdot r_{snow} \rightarrow 0,$$

где $T_{v.min}$ – допустимое с точки зрения биологии культуры снижение температуры вегетативных органов, 0С; V_{dm} – суммарный объем капельной влаги, распыляемой в течение одного технологического цикла, м³/га, C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/м³·0С, k_{snow} – коэффициент, характеризующий долю кристаллизовавшейся влаги, ρ – плотность воды ($\approx 1,0$), r_{snow} – теплота фазового перехода воды при образовании снега, Дж/кг.

Функция на данном отрезке определения предполагает повышение температуры вегетативных органов и поддержание ее не ниже биологически допустимого минимального уровня. Ограничений по объему разово распыляемой влаги в этом случае не устанавливается, однако средний размер капель должен быть не меньше 0,4 мм. Функция предполагает минимизацию образования кристаллических форм влаги. Соображения здесь следующие. Кристаллизация влаги относительно вегетативных органов растений предполагает возможность формирования льда на их поверхности. Теплопроводность льда выше воздуха, что усиливает отвод тепла от растения в фазу восстановления заморозковых температур. Вероятность гибели растений при этом существенно возрастает.

Следующей технологической функцией технической системы является регулирование температуры воздуха в среде посева. Регулирование температуры воздуха в среде посева в плане технологии нельзя разделить с регулированием температуры вегетативных органов растений. Осуществляемая посредством распыления капельно-жидкостных форм влаги, технология имеет одну физическую природу для обеих функций регулятора. Воздушная среда посева оказывает самое непосредственное влияние на температуру вегетативных органов растений, процессы ее саморегуляции и эффективность действия регулятора. В свою очередь, процессы транспирации и испарения капельно-жидкостных форм влаги оказывают существенное влияние на формирование микроклимата, а теплообмен между окружающей растения средой и вегетативными органами всегда носит двусторонний характер. Вместе с тем реализация функции регулирования температуры воздуха в среде посева может иметь свои целевые значения, а следовательно, и сама функция должна быть задана отдельно. В зависимости от направления вектора функции, регулятор предполагает либо поглощение тепловой

энергии при фазовом переходе капельно-жидкостных форм влаги в газообразную, либо передачу тепловой энергии капельной влаги в окружающую среду с возможным (но необязательным и даже нежелательным) переходом жидкостной формы в кристаллическую. В первом случае функция определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} F(-\Delta T_{\text{air}}) &= \frac{-\Delta q_{\text{air}}}{C_{\text{air}} \cdot V_{\text{air.cr}}}, \Delta T_{\text{air}} > |T_{\text{air.max}} - T_{\text{air.actual}}|, \\ -\Delta q_{\text{air}} &= -\Delta q_{\text{abm}} - \Delta q_{\text{cht}} \mp \Delta q_v \mp \Delta q_s, \quad -\Delta q_{\text{cht}} = -q'_{\text{cht}} \cdot \Delta t \\ -\Delta q_{\text{abm}} &= -q'_{\text{abm}} \cdot \Delta t, \quad -q'_{\text{abm}} = -e_{\text{abm}} \cdot r, \quad e_{\text{abm}} = f(V_{\text{abm}}; \sum R); \\ V_{\text{abm.(i)}} &= V_{\text{abm.(i-1)}} - e_{\text{abm}} \cdot \Delta t_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где $-\Delta T_{\text{air}}$ – изменение температуры воздуха в среде посева, $^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{air.max}}$ – верхний уровень оптимальной биологически обоснованной температуры воздуха окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{air.actual}}$ – актуальная температура воздуха в среде посева, $^{\circ}\text{C}$, $-\Delta q_{\text{air}}$ – изменение количества тепловой энергии воздуха в результате испарения воздушно-капельных форм влаги, а также контактного теплообмена газовой среды с капельной влагой, удерживаемой вегетативными органами растений, Дж/га, C_{air} – объемная теплоемкость воздуха, определяемая с учетом содержания парообразной влаги, Дж/м³· $^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{air.cr}}$ – объем приземного слоя атмосферы в границах растительного покрова посева, м³/га, $-\Delta q_{\text{abm}}$ – поглощение тепловой энергии воздуха в результате фазового перехода (испарения) воздушно-капельной влаги в объеме $V_{\text{air.cr}}$, Дж/га, $-\Delta q_{\text{cht}}$ – изменение тепловой энергии воздуха в результате контактного теплообмена газа и капельно-жидкостных форм влаги, Дж/га, $\Delta q_v, \Delta q_s$ – компоненты уравнения, характеризующие теплообмен между воздухом в среде посева и вегетативными органами растений, а также поверхностью почвы, Дж/га, q'_{abm} – поток теплоты в результате поглощения тепловой энергии при фазовом переходе воздушно-капельной влаги, Дж/с·га, e_{abm} – динамика испарения воздушно-капельных форм влаги в объеме $V_{\text{air.cr}}$, м³/га·с, V_{abm} – совокупный объем капельно-жидкостных форм влаги в среде посева, в том числе на расчетный момент времени i ($V_{\text{abm.(i)}}$) и $i-1$ ($V_{\text{abm.(i-1)}}$), $\sum R$ – сумма внешних факторов, определяющих динамику испарения капельных форм влаги в среде посева, Δt_i – продолжительность шага квантования процесса, с.

Таким образом, отвод тепла регулятором технической системы осуществляется за счет поглощения теплоты фазового периода при испарении воздушно-капельной влаги в регулируемом объеме приземного слоя воздуха, и контактной передачи тепла атмосферы мелкокапельной влаге, осуществляемой вплоть до выравнивания температур этих сред. Важно учитывать динамическую составляющую процессов, определяющих изменение температуры воздуха в среде посева. Основная часть тепла поглощается во время нахождения капельной жидкости в том слое приземного воздуха, температура которого регулируется. А это время практически соответствует продолжительности периода подачи дождя на участок. После этого отвод тепла и компенсация температурного режима воздуха в среде посева осуществляется посредством теплообмена с капельной влагой, удерживаемой на поверхности вегетативных органов. В результате регулятор имеет короткую, но мощную по динамике отвода тепла фазу и пролонгированную фазу с существенно сниженными возможностями регулирования температурного режима.

При описании обратного процесса, предполагающего передачу тепловой энергии капельной влаги в окружающую среду, используется та же система уравнений. Единственное отличие состоит в изменении знака направленности реализуемых процессов и функции регулятора:

$$F(\Delta T_{\text{air}}) = \frac{\Delta q_{\text{air}}}{C_{\text{air}} \cdot V_{\text{air.cr}}}, \Delta T_{\text{air}} > |T_{\text{air.min}} - T_{\text{air.actual}}|, \quad (7)$$

где $T_{\text{air.min}}$ – нижняя граница оптимального диапазона биологически обоснованной температуры воздуха окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Еще одной важной функцией технической системы в рамках разрабатываемого концепта является регулирование относительной влажности воздуха в среде посева. Это массообменная функция, предполагающая образование и диффузию парообразной влаги в приземный слой атмосферы. Причем интересующая нас часть этого слоя ограничена объемом, занимаемым на данный момент растительным покровом. В плане динамики парообразной влаги для этого слоя имеют значения процессы влагообмена между воздушной средой посева с почвой и вегетативными органами растений, а также с вышерасположенными слоями атмосферы. Функция технической системы относительно регулирования влажности воздуха в среде посева может быть задана следующим образом:

$$F(\Delta\varphi) = \frac{\Delta W_{m.e} \cdot R \cdot T}{P_{SS} \cdot V \cdot M_W}, \varphi_{\max} - \varphi_a < \Delta\varphi_{V.cr} > \varphi_{\min} - \varphi_a, \quad (8)$$

$$\frac{dW_{\rightarrow V.cr}}{dt} = K \cdot (P_{SS_{T_1}} - \varphi_{V.cr} \cdot P_{SS_{T_1}}) \cdot S_1,$$

$$\frac{dW_{V.cr \rightarrow}}{dt} = \beta \cdot (\varphi_{V.cr} \cdot P_{SS_{T_1}} - \varphi_{mh} \cdot P_{SS_{T_2}}) \cdot S_2,$$

$$K \cdot (P_{SS_{T_1}} - \varphi_{V.cr} \cdot P_{SS_{T_1}}) \cdot S_1 = \beta \cdot (\varphi_{V.cr} \cdot P_{SS_{T_1}} - \varphi_{mh} \cdot P_{SS_{T_2}}) \cdot S_2,$$

где $F(\Delta\varphi)$ – функция регулятора технической системы применительно к относительной влажности воздуха в среде посева; $\Delta\varphi_{V.cr}$ – объем потребного регулирования – изменения относительной влажности воздуха в объеме, занимаемым посевом, %; $\Delta W_{m.e}$ – количество влаги (в массовом выражении), необходимое для повышения влажности воздуха в среде посева на величину $\Delta\varphi_{V.cr}$, кг; P_{SS} – давление насыщенного пара при известной температуре газовой смеси ($T_1 \rightarrow P_{SS_{T_1}}$ и $T_2 \rightarrow P_{SS_{T_2}}$), кПа; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура газовой смеси в абсолютных единицах, ОК; V – совокупный объем газовой смеси (численно равный объему, занимаемому растительным покровом), м³; M_W – молярная масса воды, моль; φ_a – актуальная относительная влажность воздуха в среде посева, %; $\varphi_{\min}$ – минимальная, биологически обоснованная относительная влажность воздуха для культуры, %; $\varphi_{\max}$ – верхняя граница оптимального диапазона относительной влажности воздуха для культуры, %; $\frac{dW_{\rightarrow V.cr}}{dt}$ – вектор расхода испаряющейся влаги по направлению к приземному слою атмосферы в границах объема, занимаемого растительным покровом (внутренний поток), кг/с; $\frac{dW_{V.cr \rightarrow}}{dt}$ – вектор расхода парообразной влаги, суммирующий влагообменные процессы между атмосферным воздухом в среде посева и вышележащими слоями (внешний поток), кг/с; K – коэффициент пропорциональности между разностью парциальных давлений и динамикой испарения жидких форм влаги; β – коэффициент пропорциональности между разностью парциальных давлений и результирующим вектором диффузного и конвективного влагообмена на границе выделенных слоев атмосферы; $\varphi_{V.cr}$ – равновесное значение относительной влажности воздуха в среде посева, достигаемое в процессе технологического цикла работы регулятора, %; S_1 – суммарная площадь испаряющей поверхности, задействованная регулятором, м²; S_2 – площадь поверхности раздела условно выделенных слоев атмосферы, м².

Таким образом, регулятор должен обеспечивать повышение влажности воздуха в среде посева на величину, которая в сумме с актуальным уровнем относительной влажности даст значение, заведомо превышающее биологически обоснованный минимум требований культуры, но ниже верхней границы биологически обоснованного диапазона. Значение $\varphi_{V.cr}$, обозначенное при описании функции как равновесное значение относительной влажности воздуха в среде посева, достигаемое в процессе технологического цикла работы регулятора, является, как правило, и целевым. То есть значение $\varphi_{V.cr}$ задается в качестве целевой функции регулятора, а параметры технологии уже подбираются исходя из заданного целевого значения. Параметр S_1 в зависимости от используемой регулятором технологии и стадии процесса предполагает испарение с поверхности вегетативных органов растений, с поверхности воздушно-капельных форм распыляемой влаги, поверхности почвы.

Выводы. Решение комплексной задачи регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и защиты посевов от климатических рисков предполагает реализацию и осознанное управление всей совокупностью функций технической системы, включая регулирование водного режима почвы; регулирование температурного режима почвы, в том числе – компенсацию избыточной температурной напряженности и защиту от критических понижений температуры при заморозках; регулирование температуры вегетативных органов, как в случае оптимизации теплового режима, так и в случае защиты растений от заморозков; регулирование температуры воздуха как важнейшей составляющей микроклимата посева; регулирование относительной влажности воздуха в среде посева. Функции, как правило, имеют комплексную реализацию, с одновременным регулированием сразу нескольких параметров гидротермического режима агрофитоценоза. Предложенное математическое описание функций позволяет прогнозировать эти процессы сразу по всей совокупности направлений и обосновать параметры технологии гидротермического регулирования с позиций оптимальности и установленных приоритетов. Кроме того, использование функций в формализованном виде позволяет конкретизировать, в том числе на количественном уровне, требования к самой технической системе, конструкциям и способам решения поставленных задач, приоритетам по комбинации различных технологий.

Библиографический список

1. Бородычев В. В., Лытов М. Н. Техничко-технологические основы регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в условиях орошения // Научная жизнь. 2019. Т. 14. № 10 (98). С. 1484-1495. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495.
2. Бородычев В. В., Щепотько Н. А. Вопросы капельного орошения и фертигации белокочанной капусты в Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1 (49). С. 167-175.
3. Кирейчева Л. В., Карпенко Н. П. Оценка эффективности оросительных мелиораций в зональном ряду почв // Почвоведение. 2015. № 5. С. 587. DOI: 10.7868/S0032180X15030065.
4. Мелихова Е. В. Математическое моделирование солевого режима при фертигации в почвогрунтах фрактальной структуры // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2 (46). С. 249-255.
5. Несмысленов А. П. К вопросу обоснования экономической эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур в орошаемом земледелии АПК региона // Научное обозрение. 2015. № 15. С. 317-321.
6. Ольгаренко В. И., Юрченко И. Ф., Ольгаренко И. В. Применение метода Монте-Карло для моделирования рисков планируемого орошения // Научная жизнь. 2017. № 2. С. 11-19.
7. Соловьев Д. А., Журавлева Л. А. Роботизированный оросительный комплекс "Каскад" // Аграрный научный журнал. 2020. № 1. С. 74-78. DOI: 10.28983/asj.y2020i1pp74-78.
8. Chen X., Jeong S.-J. Irrigation enhances local warming with greater nocturnal warming effects than daytime cooling effects // Environmental research letters. 2018. V.13. I. 2. N. 024005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9dea.
9. Degirmenci H., Tanriverdi C., Arslan F. Assesment of irrigated areas by sprinkler and drip irrigation methods in lower Seyhan plain // Kahramanmaras sutcu imam university journal of natural sciences. 2016. V.19. I.4. P. 454-461.
10. Haider S., Ullah K. Projected crop water requirement over agro-climatically diversified region of Pakistan // Agricultural and Forest Meteorology. 2020. V. 281. P. 107824.
11. He Y., Xi B., Bloomberg M. Effects of drip irrigation and nitrogen fertigation on stand growth and biomass allocation in young triploid Populus tomentosa plantations // Forest ecology and management. 2020. V. 461. N.117937. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117937.
12. Improving irrigation scheduling of wheat to increase water productivity in shallow groundwater conditions using aquacrop / M. Goosheh, E. Pazira, A. Gholami, B. Andarzian, E. Panahpour // Irrigation and drainage. 2018. V. 67. I. 5. P. 738-754. DOI: 10.1002/ird.2288.
13. Oberholzer S., Hund A., Prasuhn V. Crop water use under swiss pedoclimatic conditions – evaluation of lysimeter data covering a seven-year period // Field Crops Research. 2017. V. 211. P. 48-65.

14. Santos O. F., Cunha F. F., Taira T. L. Increase in pea productivity associated with irrigation management // *Horticultura Brasileira*. 2018. V. 36. I. 2. P. 178-183. DOI: 10.1590/S0102-053620180205.

15. Yang Q., Huang X., Tang Q. Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations // *Science of the total environment*. 2020. V. 705. N 135984. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135984.

Conclusions. The solution of the complex task of regulating the hydrothermal regime of agrophytocenosis and protecting crops from climatic risks involves the implementation and conscious management of the totality of the functions of the technical system, including: regulation of the water regime of the soil; regulation of the temperature regime of the soil, including compensation for excessive temperature stress and protection against critical temperature drops during frosts; temperature control of vegetative organs, both in the case of optimization of the thermal regime, and in the case of protecting plants from frost; regulation of air temperature, as the most important component of the microclimate of crops; regulation of relative air humidity in the sowing environment. Functions, as a rule, have a complex implementation, with simultaneous regulation of several parameters of the hydrothermal regime of agrophytocenosis at once. The proposed mathematical description of the functions allows predicting these processes immediately across the entire set of directions and substantiating the parameters of the hydrothermal regulation technology from the standpoint of optimality and established priorities. In addition, the use of functions in a formalized form allows you to specify, including at a quantitative level, the requirements for the technical system itself, the designs and methods for solving the tasks, and the priorities for combining various technologies.

References

1. Borodychev V. V., Lytov M. N. Tehniko-tehnologicheskie osnovy regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitocenoza v usloviyah orosheniya // *Nauchnaya zhizn'*. 2019. Vol. 14. № 10 (98). P. 1484-1495. DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495.
2. Borodychev V. V., Schepot'ko N. A. Voprosy kapel'nogo orosheniya i fertigacii belokochannoj kapusty v Volgogradskoj oblasti // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2018. № 1 (49). P. 167-175.
3. Kirejcheva L. V., Karpenko N. P. Ocenka jeffektivnosti orositel'nyh melioracij v zonal'nom ryadu pochv // *Pochvovedenie*. 2015. № 5. P. 587. DOI: 10.7868/S0032180X15030065.
4. Melihova E. V. Matematicheskoe modelirovanie solevogo rezhima pri fertigacii v pochvogruntah fraktal'noj struktury // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2017. № 2 (46). P. 249-255.
5. Nesmyslenov A. P. K voprosu obosnovaniya jekonomicheskoy jeffektivnosti tehnologij vozdeleyvaniya sel'skohozyajstvennyh kul'tur v oroshaemom zemledelii APK regiona // *Nauchnoe obozrenie*. 2015. № 15. P. 317-321.
6. Ol'garenko V. I., Yurchenko I. F., Ol'garenko I. V. Primenenie metoda Monte-Karlo dlya modelirovaniya riskov planiruemogo orosheniya // *Nauchnaya zhizn'*. 2017. № 2. P. 11-19.
7. Solov'ev D. A., Zhuravleva L. A. Robotizirovannyj orositel'nyj kompleks "Kaskad" // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2020. № 1. P. 74-78. DOI: 10.28983/asj.y2020i1pp74-78.
8. Chen X., Jeong S.-J. Irrigation enhances local warming with greater nocturnal warming effects than daytime cooling effects // *Environmental research letters*. 2018. V.13. I. 2. N. 024005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9dea.
9. Degirmenci H., Tanriverdi C., Arslan F. Assesment of irrigated areas by sprinkler and drip irrigation methods in lower Seyhan plain // *Kahramanmaras sutcu imam university journal of natural sciences*. 2016. V.19. I.4. P. 454-461.
10. Haider S., Ullah K. Projected crop water requirement over agro-climatically diversified region of Pakistan // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020. V. 281. P. 107824.
11. He Y., Xi B., Bloomberg M. Effects of drip irrigation and nitrogen fertigation on stand growth and biomass allocation in young triploid *Populus tomentosa* plantations // *Forest ecology and management*. 2020. V. 461. N.117937. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117937.

12. Improving irrigation scheduling of wheat to increase water productivity in shallow groundwater conditions using aquacrop / M. Goosheh, E. Pazira, A. Gholami, B. Andarzian, E. Panahpour // *Irrigation and drainage*. 2018. V. 67. I. 5. P. 738-754. DOI: 10.1002/ird.2288.

13. Oberholzer S., Hund A., Prasuhn V. Crop water use under swiss pedoclimatic conditions – evaluation of lysimeter data covering a seven-year period // *Field Crops Research*. 2017. V. 211. P. 48-65.

14. Santos O. F., Cunha F. F., Taira T. L. Increase in pea productivity associated with irrigation management // *Horticultura Brasileira*. 2018. V. 36. I. 2. P. 178-183. DOI: 10.1590/S0102-053620180205.

15. Yang Q., Huang X., Tang Q. Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations // *Science of the total environment*. 2020. V. 705. N 135984. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135984.

Author information:

Borodychev Viktor Vladimirovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Volgograd Branch of the Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova (400002, Volgograd, Timiryazev St., 9), Doctor of Agricultural Sciences, Professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-8090>. E-mail: vkovniigim@yandex.ru

Lytov Michail Nikolaevich, Leading Researcher, Volgograd Branch of the Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation A.N. Kostyakova (400002, Volgograd, Timiryazev St., 9), Candidate of Agricultural Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825> LytovMN@yandex.ru

Информация об авторах:

Бородычев Виктор Владимирович, академик РАН, директор Волгоградского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, 9), доктор сельскохозяйственных наук, профессор.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-8090>. E-mail: vkovniigim@yandex.ru

Лытов Михаил Николаевич, ведущий научный сотрудник Волгоградского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, 9), кандидат сельскохозяйственных наук,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825> LytovMN@yandex.ru