

УДК 631.343:631.834:634  
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-12-56-61

## К МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ТЕПЛООБМЕНА В ЭНЕРГОРАЗДЕЛИТЕЛЕ

*Ы.Дж. Осмонов, Е.К. Кадыралиев*

*Аннотация.* Для защиты плодовых деревьев от заморозков в основном применяются «дедовские» методы: дымление, укутывание, дождевание, побелка, обработка химикатами и т. д. Однако эти способы сдерживают распускание цветков всего на 4–5 дней, что недостаточно для борьбы с заморозками в зонах рискованного земледелия. Рассмотрены основы методики исследования механизма теплообмена в энергоразделителе, предназначенного для защиты плодовых деревьев от заморозков путем подогрева либо охлаждения определенной части грунта, где расположена корневая часть дерева. Принцип работы энергоразделителя основан на интенсификации тепломассообменных процессов путем переноса глубинного тепла грунта к поверхности почвы и холода от поверхности в ее глубину путем циркуляции в нем водного раствора калийной соли.

*Ключевые слова:* энергоразделитель; плодовые деревья; калийная соль; перепад температуры; капиллярно-пористая структура.

---

## ЭНЕРГИЯ БӨЛҮШТҮРГҮЧТӨГҮ ЖЫЛУУЛУК АЛМАШУУДАГЫ МЕХАНИЗМДИ ИЗИЛДӨӨ МЕТОДОЛОГИЯСЫНА КАРАЙ

*Ы.Дж. Осмонов, Е.К. Кадыралиев*

*Аннотация.* Багбанчылыкта мөмөлүү дарактарды үшүктөн сактоо үчүн негизинен эски ыкмалар колдонулат: ыштоо, таңуу, чачуу, актоо, химиялык тазалоо ж.б. Бирок, бул каражаттар бутактардын гүлдөшүнө 4-5 күн гана тоскоол болот, бул коркунучтуу дыйканчылык аймактарында үшүк менен күрөшүү үчүн жетишсиз. Макалада дарактын тамыр бөлүгү жайгашкан топурактын белгилүү бир бөлүгүн жылытуу же муздатуу жолу менен мөмөлүү дарактарды үшүктөн коргоого арналган энергетикалык сепаратордо жылуулук алмашуу механизмдин изилдөө методологиясынын негиздери берилген. Энергетикалык сепаратордун иштөө принциби андагы калий тузунун суудагы эритмесин циркуляциялоо аркылуу топурактан кыртыштын бетине терең жылуулукту жана жер үстүндөгү муздакты анын тереңдигине өткөрүү аркылуу жылуулук жана масса алмашуу процесстерин интенсивдештирүүсүнө негизделген.

*Түйүндүү сөздөр:* энергетикалык сепаратор; мөмөлүү дарактар; калий тузу; температура айырмасы; капиллярдык-тешиктүү түзүлүш.

---

## ON THE METHODOLOGY OF MECHANISM RESEARCH HEAT EXCHANGE IN THE ENERGY SEPARATOR

*Y.Dzh. Osmonov, E.K. Kadyraliev*

*Abstract.* The article provides to protect fruit trees from frost, “grandfather” methods are mainly used: smoking, wrapping, sprinkling, whitewashing, chemical treatment, etc. However, these methods restrain the blossoming of flowers for only 4-5 days, which is not enough to combat frosts in risky farming areas. The basics of the methodology for studying the mechanism of heat transfer in an energy separator designed to protect fruit trees from frost by heating or cooling a certain part of the soil where the root part of the tree is located are considered. The principle of operation of the energy separator is based on the intensification of heat and mass transfer processes by transferring the deep heat of the soil to the soil surface and cold from the surface to its depth by circulating an aqueous solution of potassium salt in it.

*Keywords:* energy separator; fruit trees; potassium salt; temperature drop; capillary-porous structure.

**Введение.** В Кыргызской Республике широко распространены культуры плодовых деревьев, поэтому вопросы защиты их от весенних заморозков, а также корневой их части в малоснежные суровые зимы довольно актуальны. В современном садоводстве для защиты плодовых деревьев от заморозков в основном применяются «дедовские» методы: дымление, укутывание, дождевание, побелка, обработка химикатами и т. д. Однако эти средства сдерживают распускание цветков всего на 4–5 дней, что недостаточно для борьбы с заморозками в зонах рискованного земледелия [1].

Авторами разработан энергоразделитель, конструкция которого защищена патентом Кыргызской Республики на изобретение [2]. Энергоразделитель предназначен для обеспечения устойчивых ежегодных урожаев плодовых деревьев в зоне рискованного земледелия. Защита деревьев от заморозков с помощью этого устройства осуществляется путем обеспечения задержки начала их цветения на весь период поздней осени, зимы и ранней весны и интенсификации тепломассообменных процессов. Осуществляется это путем переноса глубинного тепла грунта к поверхности почвы и холода от поверхности в её глубину с помощью циркуляции в нём слабонасыщенного или перенасыщенного водного раствора калийной соли KCl в зависимости от существующих климатических условий [3].

**Методы и результаты.** Энергоразделитель размещается целиком в грунте так, чтобы верхняя часть почвы смогла передавать холод к нижней части, где расположена основная масса корневой системы, замораживая ее до минус 1 °С, заодно обогревая глубинным теплом грунта верхнюю часть почвы, исключая от подмерзания корни деревьев, находящиеся близко к поверхности почвы.

Общий температурный напор энергоразделителя имеет вид:

$$\Delta T_{об} = (T_{гор} - T_n^u) + T_n^u - T_n^k + (T_n^k - T_{хол}), \quad (1)$$

где  $T_{об}$  – общий перепад температуры, °С;  $T_{гор}$ ,  $T_{хол}$  – температура, соответственно, горячего и холодного источника, °С;  $T_n^u$ ,  $T_n^k$  – температура пара, соответственно, в испарителе и конденсаторе, °С.

Наиболее слабым звеном в уравнении (1) является перепад температур ( $T_{гор} - T_n^u$ ), который может резко ограничить теплопередающую способность системы охлаждения (нагрева).

В случае, когда задан тепловой поток  $Q$ , общий перепад температур  $\Delta T_{об}$  можно считать постоянным. Эффективность работы пористой системы энергоразделителя будет определяться перепадом температур между стенкой охлаждающего элемента  $T_{ст}$  и температурой пара  $T_n$  в нем. Таким образом, необходимо выявить, при каких перегревах стенки относительно температуры пара возможно наступление кризиса теплопередачи по переносу массы и тепла. Для исследования данного процесса была создана физическая модель процессов тепломассопереноса в ячейке капиллярно-пористой структуры (рисунок 1).

Возникновение интенсивного процесса кипения в структуре, находящейся в кольце энергоразделителя, объясняется быстрым перегревом плёнки относительно температуры пара. Сама же структура может формировать большое количество центров парообразования. Из условия равновесия сил для парового пузыря сферической формы определяется размер критического радиуса пузыря  $R_{кр}$ , соответственно, на скелете структуры, прилегающим к стенке, и на поверхности нагрева энергоразделителя. Величина  $R_{кр}$  фиксировалась с помощью скоростной киносъемки.

Увеличение перегрева жидкости и давления уменьшают значение  $R_{кр}$ , увеличивают общее число действующих центров парообразования, что приводит к более интенсивному перемешиванию жидкости в двухфазном перегретом пограничном слое и интенсификации теплообмена.

Ухудшение отвода тепла при некотором значении теплового потока связано с достижением определенной интенсивности парообразования, возникновением паровых объемов (конгломератов), которые затрудняют подвод жидкости к локальным зонам поверхности нагрева, как это наблюдается при кипении жидкости в большом объеме.

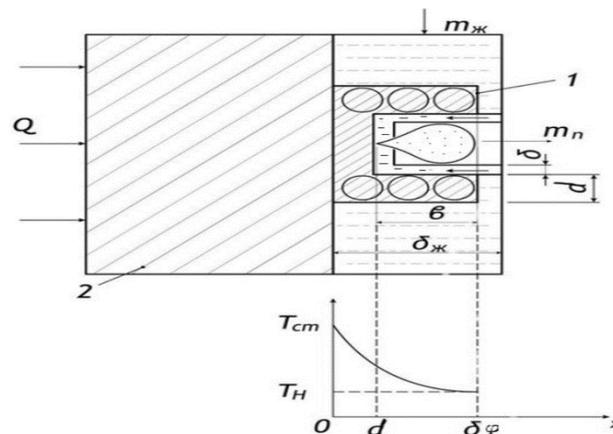


Рисунок 1 – Физическая модель процессов тепломассопереноса в ячейке капиллярно-пористой структуры

1:  $Q$  – тепловой поток, подводимый к стенке 2 энергоразделителя;

$m_{ж}$ ,  $m_n$  – расход жидкости и пара;  $T_{ст}$ ,  $T_n$  – температура стенки и насыщения,

$\delta_{ж}$ ,  $\delta$  – толщина капиллярно-пористой структуры и жидкостной прослойки;

$b$  – ширина ячейки;  $d$  – диаметр зерна (проволоки)

Жидкая пленка в таких зонах начинает пульсировать и частично пересыхать, периодически оголяет поверхность и уменьшает ее долю, участвующую в отводе тепла. Гравитационные силы, создающие избыток жидкости, должны отодвинуть кризисные явления теплообмена за счет надежной организации циркуляции жидкости и пара в пористой структуре, интенсивного отвода паровых объемов из нее и заполнения ячеек структуры вновь поступающей жидкостью из ядра стекающего относительно холодного потока.

Коэффициент теплообмена зависит от паросодержания в пористом слое и гидродинамических эффектов, связанных с её движением и парообразованием пленки перегретой жидкости в пузырьки. Можно полагать, что микрослой перегретой жидкости находится в пульсирующем режиме работы, и контакт со стенкой в общем случае осуществляется пароводяной смесью, что приводит к увеличению термического сопротивления слоя.

При большом перегреве жидкости в пограничном слое, решающее значение для форсировки теплообмена приобретает обеспечение надлежащего перепада давления ( $T_{гор} - T_n^u$ ), что достигается комбинированным действием гравитационных и капиллярных сил [4]. При этом работа  $L$ , затрачиваемая на образование сферических пузырьков, равна:

$$L = 16\pi \sigma^3 / 3\Delta P^2 = 16\pi \sigma^3 T_n^2 / 3(rQ\Delta T_{об})^2, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $H/M$ ;  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $g_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления, МПа.

Из уравнения видно (2) следует, что уменьшая  $R_{кр}$ , и увеличивая перепад давления и температуры  $\Delta P$  и  $\Delta T_{об}$ , можно уменьшить работу  $L$ . Однако при определённом  $\Delta T_{об}$  может наступить тепловая неустойчивость процесса и переход к плёночному кипению.

Работа  $L$ , при наличии дополнительных центров парообразования за счет скелета структуры, может оказаться еще меньшей за счет облегченных условий образования межфазной поверхности. Однако следует ожидать, что форма паровых пузырей будет отличаться от сферической.

Таким образом, устойчивость и интенсивность теплообмена в исследуемой системе охлаждения (нагрева) определяется наличием жидкостной прослойки  $\delta$  под паровыми пузырями. При кипении происходит беспорядочная турбулизация пограничного слоя возникающими, растущими и лопающимися пузырями. Тепло путем теплопроводности передается через пульсирующую жидкостную прослойку  $\delta$  (пленку), смачивающую обогреваемую стенку и находящуюся под паровыми пузырями, и за счет парообразования  $\gamma$  переносится в пузыри.

Увеличение турбулизации пограничного слоя и повышение устойчивости пульсирующей пленки жидкости за счет ее избытка приводит к возрастанию коэффициента теплообмена и расширению предела теплопередающей возможности системы охлаждения (нагрева)  $Q$ .

При этом избыток жидкости  $m$  определяется следующей зависимостью:

$$\dot{m} = m_{\text{ж}} / m_{\text{п}}. \quad (3)$$

Пузырь, зарождающийся в ячейке парообразования сетчатой структуры со стороны  $b$ , через некоторый промежуток времени, в зависимости от давления и толщины структуры, может коснуться своей поверхностью проволок сетки. После испарения мениска, на поверхности раздела пузыря давление пара в пузыре  $P_{\text{п}}$  становится равным давлению в объеме системы. Тогда давление в жидкости у поверхности пузыря будет больше, чем у поверхности мениска и проявится впитывающее действие ячеек менисками большей кривизны на сетке, что вызовет вновь увеличение размера пузыря, которое длится до тех пор, пока кривизна менисков на сетке не сравняется с кривизной пузыря.

Только после такого пульсирующего поведения пузыря становится возможным приток новых порций конденсата за счет капиллярных сил. Силы тяжести  $g$  будут дополнительно подпитывать ячейку генерации пара. В результате этого действующий напор  $\Delta P$ , необходимый для преодоления суммарного падения давления в паровом и жидкостном потоках, будет соответствовать кривизне мениска, определяемого половиной ширины ячейки сетки на просвет  $b/2$ . Паровой пузырь начнет распространяться в направлениях от стенки, поскольку сетка представляет регулярные центры ядрообразования.

Если перегрев жидкости  $\Delta T$ , усиливаемый за счет теплопроводности скелета структур, достигнет такой величины, когда поверхность пузыря коснется мениска жидкости, то между поверхностями нагрева и жидкости, как и в тепловых трубах, образуется открытый паровой канал, по которому начнется выравнивание избыточного давления в пузыре.

В области предельных перегревов жидкости  $\Delta T_{\text{пр}}$  пузырь расширяется вдоль теплообменной стенки, что активизирует новые центры парообразования и может привести к образованию сплошной паровой пленки вдоль стенки. Уменьшение объема пузыря будет возможно только до тех пор, пока радиус кривизны образующейся поверхности раздела между проволоками сеток (радиус пузыря) не станет меньше или равным радиусу кривизны мениска жидкости. Тогда начнется подвод жидкости к менискам из ячеек питания. Этому способствуют гравитационные силы  $g$ , создающие избыток жидкости  $\dot{m}$ .

Паровой пузырь на поверхности нагрева будет расширяться в направлении к мениску жидкости во все время его роста, а паровой канал от стенки до свободной поверхности останется открытым. С поверхности пузыря будет испаряться необходимое количество жидкости для поддержания избыточного давления в пузыре. Паровой пузырь, являясь мощным стоком тепла, мешает дальнейшему своему росту. Избыток жидкости  $\dot{m}$  в сечении структуры увеличивает отвод максимальных тепловых потоков  $Q_{\text{макс}}$ , поскольку при соответствующих размерах пор уменьшается опасность образования пленки на стенке, т. к. для облегченного распространения пузыря до свободной поверхности жидкости создаются большие ее перегревы  $\Delta T$ . К тому же наличие гравитационных сил  $g$  позволяет применять сетки с крупными ячейками  $b$ , которые работают как паровые каналы, регулярно распределенные по поверхности.

Однако и в этом случае при определенном температурном напоре  $\Delta T_{\text{пр}}$  температура проволок и стенки может достигнуть значения, соответствующего предельному перегреву жидкости, когда

теплоноситель не будет больше существовать в жидкой фазе на поверхности стенки и смачивать ее, а микропенка начнет свертываться в микрокапли. Происходит смена режима испарения микропенки в паровой пузырь на режим конвективного теплообмена парожидкостного дисперсоида, который при столкновении с поверхностями каркаса и стенки не смачивает их. Аналогичное явление имело место в порошковых и волокнистых материалах.

Описанный кризис кипения имеет термодинамическую природу, когда состояние жидкости неустойчивое и она может самопроизвольно распадаться. Для воды при атмосферном давлении предельный перегрев составляет около 210 °С и быстро уменьшается с возрастанием давления, что имело место в исследованной системе охлаждения при высоких удельных тепловых потоках  $q$ .

Видимо, при движении кипящей пленки жидкости сказывается влияние гидродинамического воздействия потоков на условия отрыва паровых пузырей. Интенсификация процесса парообразования в этом случае выражается в срыве некоторого количества пузырьков раньше, чем они достигнут величины отрывного диаметра  $d_0$ . В этих условиях происходит искажение угла смачивания, что в итоге облегчает доставку новых порций «холодной» жидкости, придавая устойчивость пульсирующей жидкостной пленке [5].

С увеличением тепловой нагрузки  $q$  растет интенсивность процесса парообразования и частоты пульсации паровых пузырей, происходит *уменьшение* толщины  $\delta$  пограничного слоя. Основная часть тепла переносится за счет парообразования  $\gamma$  в тонких перегретых пленках жидкости, находящейся на стенке, и частично внутри ячеек структуры. Тогда *коэффициент теплообмена определяется по следующей зависимости:*

$$\alpha \sim \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\sigma_{\text{ж}}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\text{эф}}$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Величина  $\lambda_{\text{эф}}$  должна зависеть от паросодержания в пористом слое и гидродинамических эффектов, связанных с движением и парообразованием пленки перегретой жидкости в пузыри. Микрослой перегретой жидкости вблизи обогреваемой поверхности находится в пульсирующем режиме и его контакт со стенкой осуществляется пароводяной смесью, что приводит к увеличению термического сопротивления слоя (особенно при развитом пузырьковом режиме кипения). Величина  $\delta_{\text{ж}}$  будет выражаться через толщину пористой структуры  $\delta_{\text{ф}}$  следующим образом:

$$\sigma_{\text{ж}} = n \sigma_{\text{ф}}, \quad (5)$$

где  $n$  – коэффициент заложения;  $n \geq 1$  – для однослойных структур в невысоких тепловых потоках;  $n < 1$  – для многослойных структур.

При высоких тепловых нагрузках следует учитывать влияние гидродинамики жидкостных и паровых потоков внутри структуры, т. к. паровые пузыри в порах начнут расти не в виде сфероидов, как это имеет место при кипении жидкости в большом объеме и в тонкопленочных испарителях, а в виде сложных форм, затрудняющих эвакуацию пара из структуры и ограничивающих подвод соответствующих порций «холодной» жидкости к обогреваемой стенке. Это приведет к росту перегрева стенки относительно температуры пара, снижению интенсивности теплообмена  $\alpha$  и к приближению кризисных явлений [6].

Стекающий вдали от стенки слой жидкости (в толще структуры и частично на ее поверхности в микроаккумуляторах прижимного устройства), создаваемый движущим напором  $\Delta P$ , будет несколько недогретым относительно температуры пристенного слоя жидкости. В связи с этим, жидкость стекающего потока устремляется к стенке, вытесняя двухфазную смесь и, тем самым, снижая ее толщину и термическое сопротивление, что приводит к частичному разрушению паровых пузырей еще до их

отрыва от стенки и прилегающей к ней пористой структуры. Более глубокое проникновение ядра потока к стенке интенсифицирует процессы теплообмена, затягивая наступление кризиса кипения.

**Выводы.** При определенных тепловых нагрузках  $q$  может произойти потеря устойчивости пристенного пульсирующего жидкостного слоя, закипание паровыми пузырями ячеек сетки, прекращение доступа жидкости к зоне нагрева, что приведет к существенному росту термического сопротивления, и пережигу стенки. И хотя будет велико число и интенсивность центров парообразования  $n$ , резко упадет эффект турбулизации, ухудшится отвод пара из структуры (см. рисунок 1). Уточнение и подтверждение предложенного механизма тепломассопереноса в сетчатых структурах, работающих с избытком жидкости, осуществлено с помощью визуализации.

Поступила: 14.11.24; рецензирована: 28.11.24; принята: 29.11.24.

#### *Литература*

1. *Новиченкова Е.Ю.* Яблони в вашем саду / Е.Ю. Новиченкова. М.: ЭКСМО, 2015. 320 с.
2. Патент Кыргызской Республики № 1972. Устройство для управления фенофазами плодовых деревьев / Нуржан Мурат, Осмонов Ы.Дж., Токтоналиев Б.С. / Патентообладатель: Нуржан Мурат, Осмонов Ы.Дж., Токтоналиев Б.С. – Оpubл. 2017. Бюл. № 8.
3. *Осмонов Ы.Дж.* Способ управления фенофазами плодовых деревьев с помощью обогрева или охлаждения установкой ветровой или солнечной энергией / Ы.Дж. Осмонов, М. Нуржан, Е.Ж. Абдулин // Вестник КНАУ им. К.И. Скрябина. 2014. № 1.
4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
5. *Поляев В.М.* Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил / В.М. Поляев, А.А. Генбач // Теплоэнергетика. 1993. № 7. С. 55–58.
6. *Генбач А.А.* Теплотехнические характеристики капиллярно-пористых теплообменников / А.А. Генбач, Н.А. Генбач // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: сб. Алма-Ата: Алматинский ин-т энергетики и связи, 2002. С. 73–76.