

**А. Н. Юрин, С. П. Кострома**

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: anton-jurin@rambler.ru, lab\_plodoyagoda@mail.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПЛОДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ**

*Аннотация.* В данной статье представлена математическая модель аналитического исследования теплообмена в плодовых насаждениях.

*Ключевые слова:* плодородное дерево, заморозок, защита, математическая модель.

**A. N. Yurin, S. P. Kostroma**

*RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: anton-jurin@rambler.ru, lab\_plodoyagoda@mail.ru*

## **RESEARCH OF THE TEMPERATURE REGIME OF FRUIT PLANTS**

*Abstract.* This article presents a mathematical model for the analytical study of heat transfer in fruit plantations.

*Keywords:* fruit tree, frost, protection, mathematical model.

### **Введение**

Одной из основных причин ежегодного недобора плодово-ягодной продукции в Беларуси является гибель генеративных органов во время весенних заморозков.

В конце зимы и весной у садовых растений заканчивается период покоя, начинают развиваться листья, цветки, образуется завязь плодов. Одновременно повышается чувствительность к низким температурам. Даже морозостойкие сорта, которые выдерживают сорокоградусные морозы, во время цветения чувствительны к легким заморозкам весной.

Весна характеризуется очень изменчивой погодой. Довольно часто случаются заморозки. Цветки и завязи яблони гибнут уже при температуре воздуха около  $-4$  °С. Однако это может случиться и при  $0...-2$  °С. Если после повреждения от заморозков цветы и завязи не осыпались, то в дальнейшем из них образуются деформированные и некачественные плоды, а урожайность будет значительно снижена. Поэтому одними из перспективных направлений повышения продуктивности садовых деревьев являются разработка и реализация технологических процессов и технических средств для защиты плодовых насаждений. Для разработки технических средств для защиты плодовых насаждений следует использовать математическую модель для оценки количества тепловой энергии, необходимой для поддержания заданного температурного режима плодовых насаждений.

### **Основная часть**

Известные математические модели, характеризующие радиационный заморозок, охватывают упрощенные случаи расчета теплового баланса и дают приближенную оценку отдельных составляющих, не учитывая тепловые потоки за счет испарения и конденсации, а также скорость конвективного переноса [1, 2].

Для обоснования равновесной температуры и необходимого теплового потока для поддержания заданного температурного режима необходимо разработать математическую модель.

Уравнение теплового баланса поверхности генеративной почки плодового дерева можно представить в виде

$$\pm Q_{conv} \pm Q_{cond} \pm Q_{r\Sigma} = 0, \quad (1)$$

где  $Q_{conv}$  – конвективный тепловой поток к поверхности генеративной почки, Вт;  $Q_{cond}$  – тепловой поток за счет конденсации водяного пара из окружающего воздуха на генеративные почки, Вт;  $Q_{r\Sigma}$  – суммарный радиационный тепловой поток от грунта, окружающего воздуха и поток, излученный генеративной почкой, Вт.

Конвективный тепловой поток к поверхности генеративных почек определим по уравнению Ньютона – Рихмана [3]

$$Q_{conv} = \alpha F_{п} (T_{в} - T_{п}), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{п}$  – площадь поверхности генеративных почек, м<sup>2</sup>;  $T_{в}$  – температура окружающего воздуха, К;  $T_{п}$  – температура генеративных почек, К.

$$\alpha = (4 + 2W_{в}), \quad (3)$$

где  $W_{в}$  – скорость конвективного переноса, м/с.

Определим тепловой поток за счет конденсации водяного пара из окружающего воздуха на генеративных почках

$$Q_{cond} = \beta F_{п} (\rho_{v a} - \rho_{v}) r_{cond}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $\rho_{v a}$  – плотность паров воды в окружающем воздухе, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{v}$  – плотность насыщенных паров воды в воздухе при данной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{cond}$  – теплота конденсации (парообразование), Дж/кг.

Плотность паров воды в окружающем воздухе найдем по формуле

$$\rho_{v a} = (\varphi \rho_{v}) / 100, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность окружающего воздуха, %.

Суммарный радиационный тепловой поток от грунта, окружающего воздуха и поток, излученный генеративными почками, представим так:

$$Q_{r\Sigma} = Q_{rГ} + Q_{rв} - Q_{rп}, \quad (6)$$

где  $Q_{rГ}$  – радиационный тепловой поток от грунта до генеративных почек, Вт;  $Q_{rв}$  – радиационный тепловой поток от окружающего воздуха до почек, Вт;  $Q_{rп}$  – радиационный тепловой поток от почек в грунт и окружающий воздух, Вт.

Каждый из радиационных тепловых потоков определяется на основе закона Стефана – Больцмана [4]

$$Q_r = \sigma F T^4, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – константа излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F$  – площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $T$  – температура поверхности, К.

Константа излучения серого тела определяется по формуле

$$\sigma = (1 - A) \sigma_0, \quad (8)$$

где  $A$  – альbedo (отражательная способность) поверхности;  $\sigma_0$  – константа излучения Стефана – Больцмана абсолютно черного тела (5,67·10<sup>-8</sup> Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)) [5].

Тогда радиационный тепловой поток от грунта

$$Q_{rГ} = \sigma F_{пГ} T_{Г}^4, \quad (9)$$

где  $F_{пГ}$  – площадь поверхности генеративных почек, обращенная к почве, м<sup>2</sup>;  $T_{Г}$  – температура грунта, К.

Поскольку воздух поглощает и излучает, но не отражает, то радиационной тепловой поток от окружающего воздуха представим в виде

$$Q_{rв} = \sigma_0 (0,526 + 0,065\sqrt{p_{va}}) F_{пв} T_0^4, \quad (10)$$

где  $p_{va}$  – парциальное давление паров воды в окружающем воздухе на высоте 2 м, Па;  $F_{пв}$  – площадь поверхности почек, обращенная к окружающему воздуху, м<sup>2</sup>;  $T_0$  – температура окружающего воздуха, К.

Парциальное давление паров воды в окружающем воздухе определяем по формуле

$$p_{va} = (\phi p_v) / 100 \%, \quad (11)$$

где  $p_v$  – парциальное давление насыщенных паров воды в воздухе при данной температуре, Па.

Излучение всех генеративных почек можно определить по формуле

$$Q_{rл} = \sigma (F_{пг} + F_{пв}) T_л^4. \quad (12)$$

В результате тепловой баланс можно записать следующим образом:

$$Q_{conv}(T_{п}) + Q_{cond}(T_{п}) + Q_{rг} + Q_{rв} - Q_{rп}(T_{п}) = (aF_{п}(T_{в} - T_{п})) + (\beta F_{п}(\rho_{va} - \rho_v)r_{cond}) + \\ + (\sigma F_{пг} T_г^4) + (\sigma_0 (0,526 + 0,065\sqrt{p_{va}}) F_{пв} T_0^4) - (\sigma (F_{пг} + F_{пв}) T_{п}^4) = 0. \quad (13)$$

Данная математическая модель теплового баланса позволяет физически обосновать равновесную температуру и необходимый тепловой поток, подвод которого позволит поддержать заданный температурный режим в плодовых насаждениях, что в дальнейшем даст возможность обосновать рациональные параметры технического средства для защиты плодовых деревьев от весенних заморозков.

На рис. 1 представлены результаты расчета равновесной температуры генеративных почек по уравнению (13) при следующих условиях: влажность воздуха – 60 %; скорость конвективного переноса – 0 м/с; площадь всей поверхности почек – 2,0 м<sup>2</sup>; безоблачная погода; альбедо почвы – 0,05; альбедо почек – 0,15. Параметры задавали на высоте 2,0 м. Предельная температура почек достигала 0 °С.

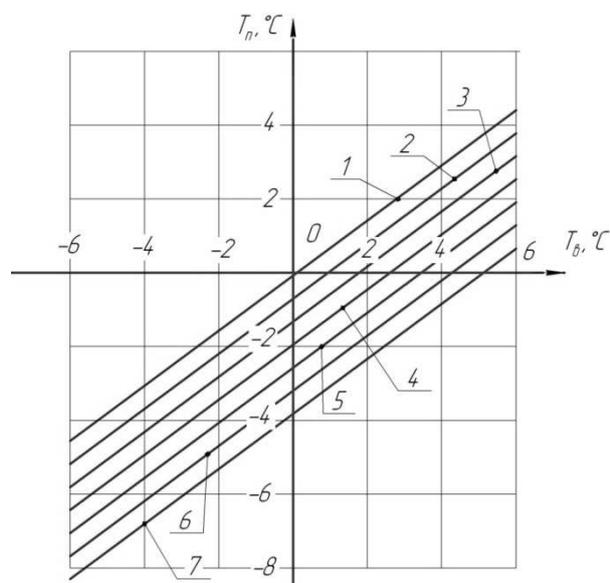


Рис. 1. Зависимость равновесной температуры генеративных почек ( $T_{п}$ ) от температуры окружающего воздуха ( $T_{в}$ ) при температурах почвы 6 °С (1), 4 °С (2), 2 °С (3), 0 °С (4), -2 °С (5), -4 °С (6), -6 °С (7)

Из рис. 1 видно, что равновесные температуры генеративных почек идут практически линейно, поскольку при данных условиях конденсации водяных паров не происходит.

Если задать предельную температуру генеративных органов – минимальную температуру, которую они выдержат без повреждений ( $T_{л\lim}$ ), то это уравнение позволит определить необходимый тепловой поток, подвод которого позволит удержать температуру на требуемом уровне. При этом

$$\Delta Q = Q_{conv}(T_{л\lim}) + Q_{cond}(T_{л\lim}) + \\ + Q_{rг} + Q_{rв} - Q_{rп}(T_{л\lim}). \quad (12)$$

Если разница тепловых потоков отрицательна, то необходимо подвести такое количество теплоты, которое выровняет тепловой баланс.

На рис. 2 представлена зависимость требуемой мощности источника теплоты для поддержания температуры генеративных почек,

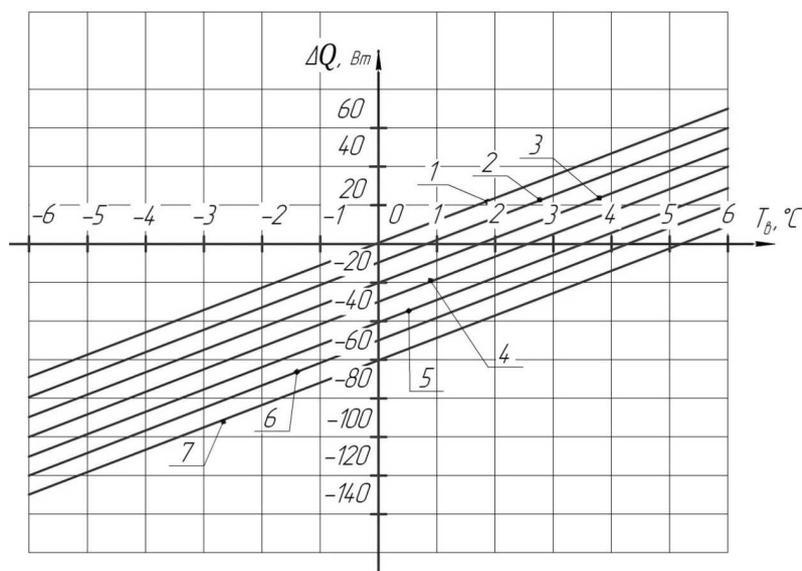


Рис. 2. Зависимость требуемой мощности источника теплоты ( $\Delta Q$ ) для поддержания температуры генеративных почек, равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , от температуры окружающего воздуха ( $T_{\text{в}}$ ) при температурах почвы  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1),  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2),  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (3),  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (4),  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (5),  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (6),  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (7)

равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , от температуры окружающего воздуха при различных температурах почвы и тех же условиях, что на рис. 1.

Суммарная мощность источника теплоты приведена для участка плодовых насаждений площадью 1 га.

Анализ графиков показывает, что более сухой воздух способствует возникновению заморозка, в то время как влажный воздух ему противостоит. Это явление связано с уменьшением парциального давления паров воды в более сухом воздухе и соответствующим снижением теплоты излучения окружающего воздуха, которое подогревает генеративные органы.

В таблице представлены количество теплоты  $\Delta Q$  и потребный расход топлива  $m_f$  для удержания температуры генеративных почек в течение 1 ч на уровне  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температуре почвы  $T_p$  и при низшей теплотворной способности топлива для двух рядов деревьев на одном прогоне участка размерами  $100 \times 100\text{ м}$ .

**Количество теплоты и расход топлива ( $\Delta Q$ ) для поддержания температуры на заданном уровне ( $T_{\text{н}} = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в течение 1 ч при различной относительной влажности**

$T_{\text{в}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{р}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 40\%$		$\varphi = 60\%$	
		$\Delta Q, \text{ МДж}$	$m_{\text{р}}, \text{ кг}$	$\Delta Q, \text{ МДж}$	$m_{\text{р}}, \text{ кг}$
0	-7	164,364	3,913	148,804	3,543
+2	-5	128,693	3,064	111,494	2,654
+4	-3	91,652	2,182	72,648	1,729
0	-7	135,691	3,231	105,332	2,508
+2	-5	96,999	2,309	73,169	1,742
+4	-3	56,700	1,350	Заморозка нет	

Из таблицы видно, что наибольшее потребное количество теплоты необходимо при более сухом воздухе, поэтому дальнейшие результаты приводятся для относительной влажности воздуха  $\varphi = 40\%$ . Увеличение влажности ведет к увеличению температуры генеративных органов, и к этому следует стремиться при проведении защиты плодовых насаждений от заморозка.

Управлять процессом защиты генеративных органов можно путем изменения или влажности, или температуры воздуха, или используя их комбинацию. Рациональным решением является комбинированное изменение температуры и влажности воздуха, которое принимается для кон-

кретных исходных условий. Наиболее опасными условиями являются температура воздуха +4 °С и влажность менее 40 %. При более сухом воздухе необходимо большее количество теплоты для поддержания заданной температуры генеративных органов. Увеличение влажности воздуха приводит к уменьшению необходимого количества теплоты. Так, при температуре воздуха +4 °С, температуре почвы –3 °С и относительной влажности 40 % необходимо 91,65 МДж теплоты для поддержания температуры на уровне +1 °С. При тех же условиях, но относительной влажности 80 %, необходимо уже 56,70 МДж теплоты, а при относительной влажности 100 % заморозок уже не возникает.

### Выводы

1. Наибольшее потребное количество теплоты необходимо при более сухом воздухе. Увеличение влажности ведет к увеличению температуры генеративных органов, и к этому следует стремиться при проведении защиты плодовых насаждений от заморозка.

2. Необходимое количество теплоты для поддержания заданного температурного режима зависит от конкретных исходных условий – значений температуры и влажности. Наиболее опасными исходными условиями являются температура воздуха +4 °С и влажность менее 40 %, поскольку при более сухом воздухе требуется большее количество теплоты для поддержания заданной температуры. Так, при температуре воздуха +4,0 °С и влажности 40 % температура на поверхности почвы будет –3,0 °С, а температура генеративных почек – 0 °С. При тех же условиях воздуха и почвы, но влажности 100 % температура генеративных почек достигнет +2,0 °С. При температуре воздуха +4,0 °С, температуре почвы –3,0 °С и относительной влажности 40 % необходимо 91,65 МДж теплоты для поддержания температуры на уровне +1,0 °С. При тех же условиях, но относительной влажности 80 %, необходимо 56,70 МДж теплоты, а при относительной влажности 100 % заморозок уже не возникает.

### Список использованных источников

1. Брент, Д. Физическая и динамическая метеорология / Д. Брент ; пер. с англ. М. П. Певзнер и М. И. Юдина ; под ред. Б. И. Извекова. – М. : Гидрометеиздат, 1938. – 398 с.
2. Чудновский, А. Ф. Заморозки / А. Ф. Чудновский ; под ред. акад. А. Ф. Иоффе. – М. : Гидрометеиздат, 1949. – 124 с.
3. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
4. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стер. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
5. Комплексное исследование и моделирование взаимосвязанных процессов переноса тепла, влаги и водорастворимых соединений в почвогрунтах / Г. П. Бровка [и др.] // Тр. IV Минск. Междунар. форума по тепло- и массообмену. – Минск : АНК ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2000. – Т. 8 : Тепломассобмен в капиллярно-пористых телах. – С. 135–144.