

3. Теория и практика управления техногенными рисками: учеб. пособие / О.К. Nikol'skij [и др.]; под общ. ред. О.К. Nikol'skogo. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2015. – 219 s.
4. Kostjukov A.F., Cherkasova N.I., Afanas'eva A.I. Metodika jeksperimental'nyh issledovanij jelektropatologii dojnnyh korov na jelektromehanizirovannyh fermah // Polzunovskij vestnik. – 2014. – Т. 1. – № 4. – S. 211–2014.
5. Nikol'skij O.K., Soshnikov A.A., Polonskij A.V. Razvitie nauchnyh osnov bezopasnosti jelektroustanovok zdanij // Vestnik AltGTU. – 2000. – № 3. – S. 17–24.
6. Cherkasova N.I. Mnogokriterial'naja ocenka jeffektivnosti funkcionirovanija sel'skih jelektricheskikh setej 10-0,4 kV v uslovijah neopredelennosti / pod red. O.K. Nikol'skogo. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 160 s.
7. Larichev O.I., Moshkovich E.M. Kachestvennye metody prinjatija reshenij. Verbal'nyj analiz reshenij. – M.: Nauka, Fizmatlit, 1996. – 208 s.
8. Nikol'skij O.K., Kostjukov A.F., Cherkasova N.I. Problema neopredelennosti pri analize riskov jelektroustanovok // Polzunovskij vestnik. – 2014. – Т. 1. – S. 140–146.
9. Patent na izobretenie № 2556299 Rossijskaja Federacija, 4.02.2014 g. Sposob opredelenija ostatochnogo resursa jelektroprovodki / Vorob'ev N.P., Vorob'eva S.N., Goncharenko G.A., Nikol'skij O.K. – Patentoobladatel' FGBOU VPO «Altajskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. I.I. Polzunova».



УДК 664.834.1.039.51

Д.Н. Бобов, И.В. Алтухов

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЁКЛЫ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЕМ

D.N. Bobov, I.V. Altukhov

### EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF BEETROOTS IN DRYING PROCESSES WITH INFRARED RADIATION

**Бобов Д.Н.** – асп. каф. энергообеспечения и теплотехники Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный. E-mail: Dmitry19081990@yandex.ru

**Алтухов И.В.** – канд. техн. наук, доц. каф. энергообеспечения и теплотехники Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный. E-mail: altukhigor@yandex.ru

**Bobov D.N.** – Post-Graduate Student, Chair of Power Supply and Heating Engineering, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, Settlement Molodyozhny. E-mail: Dmitry19081990@yandex.ru

**Altukhov I.V.** – Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Power Supply and Heating Engineering, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Region, Irkutsk District, Settlement Molodyozhny. E-mail: altukhigor@yandex.ru

*Цель работы: разработка эффективных режимов ИКЭ на основе ЭФС корнеплодов свёклы с целью улучшения качественных показателей исследуемого продукта. Была разработана методика проведения экспериментальных исследований по определению ЭФС свёклы на основе четырёхзондового метода (ЧЗМ) определения удельного сопротивления с*

*использованием экспериментальной установки для термообработки «ИЛ-3М». Кроме того, осуществлена разработка алгоритма по определению эффективных режимов инфракрасного энергоподвода (ИКЭ) и выбор наиболее оптимального ИКИ по полученным экспериментальным данным. В ходе проведения анализа методов по определению ЭФС иссле-*

дуемого корнеплода было установлено, что наиболее подходящим является ЧЗМ измерения удельного сопротивления. Определены достоинства данного метода измерения. Для применения метода разработана принципиальная электрическая схема, состоящая из трансформатора, подставки с зондовыми контактами и измерительного прибора. С учётом изменения массы навески измельчённых корнеплодов свёклы произведён расчёт изменения влажности в процессе тепловой обработки. Полученные данные проанализированы, построены зависимости влажности от сопротивления. На основе полученных данных произведён выбор эффективного режима ИКЭ при использовании определённой цикличности в заданном временном интервале.

**Ключевые слова:** электрофизические свойства (ЭФС), сушка, инфракрасное излучение, инфракрасный излучатель (ИКИ), корнеплоды свёклы.

*The purpose of the study was the development of infrared radiation energy (IRE) effective modes on the basis of electrophysical properties (EPP) of root crops of beet for the purpose of improvement of quality indicators of the studied product. The technique of carrying out pilot studies by definition of EPP of beet on the basis of four-probe method (FPM) of determination of specific resistance with the use of experimental installation was developed for heat treatment of "IL-3M". Besides, the development of algorithm by definition of the effective modes of infrared power supply (IPS) and the choice of the most optimum IRR on the obtained experimental data was carried out. During the analysis of methods by definition of EPP of the studied root crop it was established that the most suitable was FPM of measurement of specific resistance. Advantages of this method of measurement were determined. The schematic electric circuit consisting of the transformer, the support with probe contacts and the measuring device was developed for application of the method. Taking into account the change of mass of a hinge plate of the crushed beet root crops, the calculation of change of humidity in the course of thermal treatment was made. The obtained data were analyzed; dependences of humidity on resistance were constructed. On the basis of the obtained data the choice of IRE effec-*

*tive mode when using a certain recurrence in the set time interval was made.*

**Keywords:** *electrophysical properties (EPP), drying, infrared radiation (IR), infrared emitter (IRE), beet root crops.*

**Введение.** Технологические процессы по обработке сельскохозяйственной продукции с применением ИК-излучения существенно влияют на характеристики получаемого сырья. Качество продукции определяется совокупностью свойств, которые обуславливают её пригодность к удовлетворению потребности населения. Поэтому возникает необходимость в разработке таких режимов ИК-энергоподвода, которые бы оказывали положительное воздействие на все компоненты продукта в течение определённого времени при заданной температуре. Однако слишком высокая температура или слишком большая выдержка могут привести к пересыханию сырья, а значит, и к недопустимому снижению качества продукции.

В ходе изучения данного вопроса основной упор сделан на выбор эффективных режимов ИК-энергоподвода с учётом изменения электрофизических свойств данного корнеплода. Выбор именно свёклы обусловлен рядом факторов. Во-первых, эта культура является наиболее приспособленной для выращивания в Сибирском регионе, во-вторых, корнеплод является скоропортящимся, поэтому процесс его переработки и хранения требует значительных усовершенствований.

Исследование электрофизических параметров продуктов растительного происхождения показало необходимость измерения удельного электрического сопротивления (удельной электрической проводимости) в процессе проведения сушки обрабатываемых образцов. Данные экспериментальных исследований представляют большое значение при нахождении взаимосвязи электрофизических свойств с параметрами ИК-энергоподвода [1].

**Цель исследований.** Разработка эффективных режимов ИК-энергоподвода на основе электрофизических свойств корнеплодов свёклы с целью улучшения качественных показателей исследуемого продукта.

**Задачи исследований:** провести анализ методов для определения электрофизических

свойств исследуемого корнеплода; разработать методику определения электрофизических свойств корнеплода; разработать алгоритм определения эффективных режимов тепловой обработки корнеплода; на основе полученных данных произвести выбор эффективных режимов ИК-энергоподвода.

**Материалы и оборудование.** Для определения электрофизических свойств корнеплода используется сорт свёклы Бордо 237. Установка для сушки ИЛ-3М с применением различных ИК-излучателей; цифровые весы «Polaris»; лазерный пирометр IR-350 «INFRAROT»; вымытые и очищенные образцы корнеплода нарезают соломкой 3×3×30 мм. на промышленной овощерезке; ящик с понижающим трансформатором типа ЯТП-0,25-220/12; мегомметр ЭС0202/2-Г; мультиметр «Mastech 830L», медицинские иглы в качестве зондовых контактов, которые расположены на специальной подставке. Также использовались образцы высушенного корнеплода, находящиеся на хранении в лаборатории

кафедры «Энергообеспечение и теплотехника» ИрГАУ им. А.А. Ежовского.

Проведённый анализ методов по определению электрофизических свойств корнеплода показал, что наиболее подходящим для проведения данных экспериментальных исследований является четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления [2]. Достоинствами метода являются возможность получения замеров с высокой точностью и простота строения средств измерения. Применение четырёхзондового способа измерения не требует создания токовых омических контактов, поэтому определение удельного сопротивления применимо к образцам с разнообразными геометрическими параметрами. Главным условием применения данного способа измерения является наличие плоской части на поверхности образца, размеры которой превышают размеры системы зондов [2, 3]. Схема измерения удельного сопротивления четырёхзондовым методом представлена на рисунке 1.

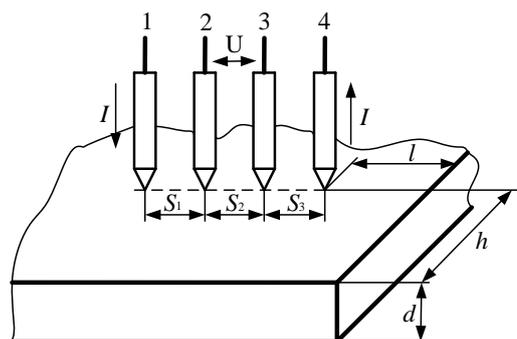


Рис. 1. Схема измерения удельного сопротивления четырёхзондовым методом

На поверхности исследуемого измельченного продукта линейно размещают четыре зондовых контакта. Через пару контактов (1 и 4) пропускается переменный ток напряжением 12 В. Внутренние контакты 2 и 3 необходимы для измерения разности потенциалов. Расчёт удельного сопротивления (Ом·см) производится по следующей формуле:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2+S_3} - \frac{1}{S_1+S_2} + \frac{1}{S_3}}, \quad (1)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – расстояния между контактами, см.

Расстояния между контактами в ходе эксперимента равны (0,5 см), поэтому расчётная формула упростится

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2+S_3} - \frac{1}{S_1+S_2} + \frac{1}{S_3}} = \frac{U}{I} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{S} - \frac{1}{S}} = \frac{U}{I} \cdot 2\pi S = \frac{US}{I} \cdot F_L. \quad (2)$$

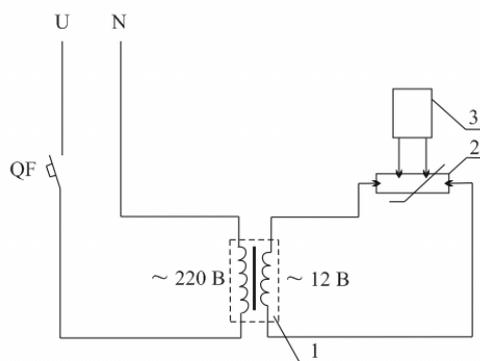
Множитель  $F_L$  может принимать разные значения в зависимости от применения разных пар контактов для пропускания тока и измерения разности потенциалов. Значения множителя  $F_L$  при возможных вариантах включения токовых и потенциальных контактов приведены в таблице 1 [4].

**Значения множителя  $F_L$  при возможных вариантах включения токовых и потенциальных контактов**

Контакты		Значения множителя $F_L$
токовые	потенциальные	
1–4	2–3	2п
2–3	1–4	2п
1–3	2–4	3п
2–4	1–3	3п
1–2	3–4	6п
3–4	1–2	6п

Наиболее часто используются первые две схемы включения, так как они гарантируют наибольшее регистрируемое напряжение, поэтому в ходе эксперимента акцент сделан на них [5].

Для осуществления замеров используется принципиальная электрическая схема проведения эксперимента, показанная на рисунке 2.



*Рис. 2. Принципиальная электрическая схема проведения эксперимента:  
1 – понижающий трансформатор; 2 – измельчённый образец корнеплода;  
3 – мультиметр*

В ходе проведения предварительных замеров были получены первичные результаты: сопротивление высушенных образцов свёклы составило  $10^3$  МОм, сырых 0,02 МОм. При пропускании переменного электрического тока напряжением 12 В через пару контактов (1 и 4) была получена разность потенциалов 5–7 В между внутренними контактами (2 и 3).

Вымытые и очищенные образцы свёклы сорта Бордо 237 нарезают соломкой  $3 \times 3 \times 30$  мм на промышленной овощерезке (рис. 3).

Далее образцы корнеплода разбивают по навескам массой 40 грамм. Общая масса навески с подставкой составила 196 грамм. Эксперимент проводится с применением экспериментальной установки «ИЛ-3М». Технологическая схема установки приведена на рисунке 4. Каркас

установки выполнен из нержавеющей стали толщиной

2 мм, который покрыт антикоррозионной краской. Для наименьших тепловых потерь камера ИК-облучения защищена термоизоляционным материалом на асбестовой основе, который покрыт светоотражающим лаком. В нижней части установки расположен тумблер питания излучателя и вольтметр. Процесс сушки осуществляется в ручном режиме. Регулирование подвода инфракрасного излучения производится за счёт применения различных режимов ИК-энергоподвода с заданной цикличностью, а также за счёт изменения высоты подвеса излучателя.

В процессе проведения эксперимента используются три типа ИК-излучателей, общий вид которых представлен на рисунке 5.



Рис. 3. Общий вид промышленной овощерезки

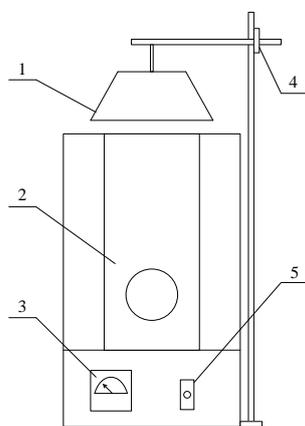


Рис. 4. Технологическая схема экспериментальной установки «ИП-3М»:  
1 – ИК-облучатель; 2 – подвижная часть со смотровым окном; 3 – вольтметр;  
4 – механизм регулирования высоты подвеса излучателя;  
5 – тумблер питания

Следует отметить, что эксперимент проводится с учётом определённой цикличности ИК-энергоподвода в трёх вариантах: с повышением, с понижением, с постоянным уровнем ИК-энергоподвода в течение 60, 90 и 120 минут. После каждого рабочего цикла производятся замеры рабочей температуры образцов ( $t_{\text{раб}}$ , °С) с помощью лазерного пирометра IR-350 «INFRAROT», массы ( $m$ , г) при помощи цифровых весов «Polaris», сопротивления ( $R$ , МОм) с использованием мегомметра ЭС0202/2-Г и мультиметра «Mastech 830L».

В ходе проведения эксперимента были проанализированы получившиеся значения с использованием разработанного алгоритма для выбора эффективных режимов ИК-энергоподвода (рис. 6). Наиболее оптимальные значения в процессе сушки получились при использовании импульсного керамического ИК-излучателя при повышении уровня ИК-энергоподвода в течение 120 минут, поэтому данный режим с использованием излучателя ECS-2 принят как эффективный. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

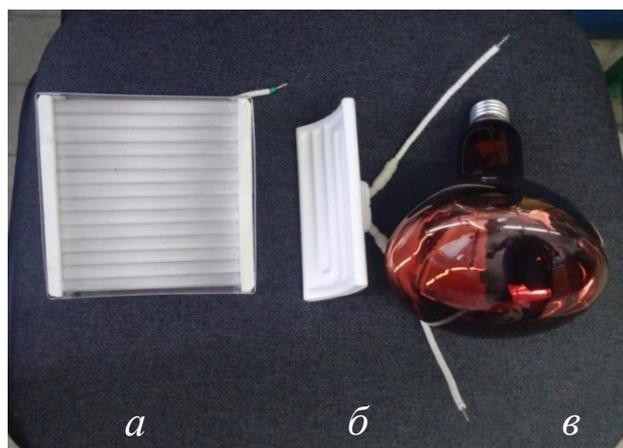


Рис. 5. Общий вид ИК-излучателей: а – кварцевый излучатель QP-2 ( $P=250 \text{ Вт}$ ,  $\lambda=2,2 \text{ мкм}$ ); б – импульсный керамический излучатель ECS-2 ( $P=250 \text{ Вт}$ ,  $\lambda=3,6 \text{ мкм}$ ); в – лампа ИКЗК ( $P=250 \text{ Вт}$ ,  $\lambda=1,5 \text{ мкм}$ )



Рис. 6. Алгоритм проведения экспериментальных исследований по определению эффективных режимов ИК-энергоподвода

Таблица 2

Данные эксперимента при повышении уровня ИК-энергоподвода в течение 120 минут

Время, мин	Вид излучателя					
	ИКЗК		ECS-2		QP-2	
	R, МОм	W, %	R, МОм	W, %	R, МОм	W, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0,02	87	0,02	87	0,02	87
3	0,02	87	0,02	87	0,02	87
13	0,03	82	0,04	82	0,03	82

1	2	3	4	5	6	7
24	0,03	82	0,04	82	0,03	82
34	0,04	77	0,05	77	0,04	77
45	0,05	72	0,05	77	0,04	77
55	0,05	72	0,06	72	0,05	72
66	0,06	67	0,06	67	0,06	67
76	0,07	62	0,06	67	0,06	67
87	0,07	62	0,07	62	0,07	62
97	0,08	57	0,07	62	0,07	62
108	0,09	52	0,1	52	0,08	57
118	0,1	47	0,11	47	0,09	57

Цикличность эксперимента с повышением уровня ИК-энергоподвода в течение 120 минут имеет следующий вид:

- 1 – 1-й цикл: 3 минуты работа – 7 минут пауза;
- 2 – 2-й цикл: 4 минуты работа – 6 минут пауза;
- 3 – 3-й цикл: 5 минут работа – 5 минут пауза;
- 4 – 4-й цикл: 6 минут работа – 4 минуты пауза;
- 5 – 5-й цикл: 7 минут работа – 3 минуты пауза;
- 6 – 6-й цикл: 8 минут работа – 2 минуты пауза.

Значение начальной влажности свёклы принято 87 % [6]. Расчёт изменения влажности (%)

в ходе эксперимента производится по следующей формуле:

$$w = w_0 - \left( \frac{M - M_n}{M_0} \cdot 100 \right), \quad (3)$$

где  $W_0$  – начальная влажность корнеплодов свёклы, %;  $M$  – общая масса подставки с навеской до сушки, г;  $M_n$  – общая масса подставки с навеской после сушки, г;  $M_0$  – масса навески, г.

По полученным данным построены зависимости  $W=f(R)$ , которые представлены на рисунке 7.

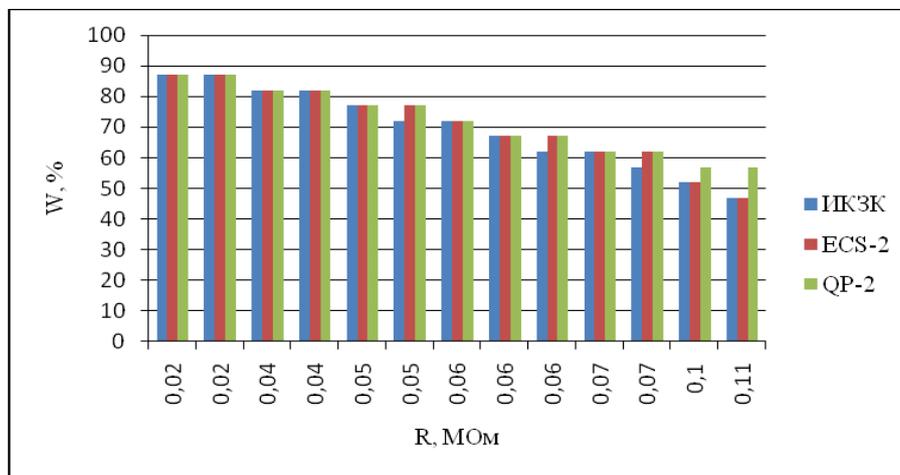


Рис. 7. Сушка с повышением уровня ИК-энергоподвода в течение 120 минут

**Заключение.** Проведённый анализ методов для определения электрофизических свойств исследуемого корнеплода показал, что наиболее подходящим для проведения данных экспериментальных исследований является четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления. Для проведения эксперимента разра-

ботана методика определения электрофизических свойств корнеплода и разработан алгоритм определения эффективных режимов тепловой обработки корнеплода. На основе полученных данных произведён выбор эффективного режима ИК-энергоподвода.

## Литература

1. Бобов Д.Н., Алтухов И.В. Применение эффективных режимов ИК-энергоподвода в технологии сушки свёклы ИК-излучением с целью улучшения качественных показателей исследуемого продукта // Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию аспирантуры ИрГСХА (3–5 декабря 2013 г.). – Иркутск: Изд. ИрГСХА, 2013. – Ч. II. – С. 132–135.
2. Бобов Д.Н., Алтухов И.В. Методы определения электрофизических показателей пищевых продуктов растительного происхождения в процессах сушки ИК-излучением // Актуальные проблемы энергетики АПК: Мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. / под. ред. В.А. Трушкина. – Саратов: Буква, 2014. – С. 45–50.
3. Бобов Д.Н., Алтухов И.В. Современные проблемы и перспективы развития АПК: мат-лы регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию ФГБОУ ВПО ИрГСХА (25–27 февраля 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. – Ч. II. – С. 145–151.
4. Зарапин В.Г. Электрофизические методы и приборы контроля качества продукции. – Минск: Изд-во БГТУ, 2006. – 130 с.
5. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.
6. Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 184 с.

## Literatura

1. Bobov D.N., Altuhov I.V. Primenenie jeffektivnyh rezhimov IK-jenergopodvoda v tehnologii sushki svjokly IK-izlucheniem s cell'ju uluchshenija kachestvennyh pokazatelej issleduemogo produkta // Jekologicheskaja bezopasnost' i perspektivy razvitija agrarnogo proizvodstva Evrazii: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvjashh. 60-letiju aspirantury IrGSHA (3–5 dekabrja 2013 g.). – Irkutsk: Izd. IrGSHA, 2013. – Ch. II. – S. 132–135.
2. Bobov D.N., Altuhov I.V. Metody opredelenija jelektrofizicheskikh pokazatelej pishhevyh produktov rastitel'nogo proishozhdenija v processah sushki IK-izlucheniem // Aktual'nye problemy jenergetiki APK: Mat-ly V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / pod. red. V.A. Trushkina. – Saratov: Bukva, 2014. – S. 45–50.
3. Bobov D.N., Altuhov I.V. Sovremennye problemy i perspektivy razvitija APK: mat-ly region. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvjashh. 80-letiju FGBOU VPO IrGSHA (25–27 fevralja 2014 g.). – Irkutsk: Izd-vo IrGSHA, 2014. – Ch. II. – S. 145–151.
4. Zarpin V.G. Jelektrofizicheskie metody i pribory kontrolja kachestva produkcii. – Minsk: Izd-vo BGTU, 2006. – 130 s.
5. Rogov I.A. Jelektrofizicheskie metody obrabotki pishhevyh produktov. – M.: Agropromizdat, 1988. – 272 s.
6. Chubik I.A., Maslov A.M. Spravochnik po teplofizicheskim harakteristikam pishhevyh produktov i polufabrikatov. – M.: Pishh. promst', 1970. – 184 s.

