

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОДОВ И ЯГОД ПРИ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКЕ

A.N. Rasshchepkin

DYNAMICS OF CHANGES IN THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF FRUITS AND BERRIES DURING FREEZE-DRYING

Расщепкин А.Н. – канд. техн. наук, доц. каф. теплохладотехники Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета), г. Кемерово. E-mail: technoholod@mail.ru

Rasshchepkin A.N. – Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Heating Ventilation and Air Conditioning, Kemerovo Technology Institute of Food Industry (University), Kemerovo. E-mail: technoholod@mail.ru

Знания о теплофизических свойствах необходимы при расчете технологических процессов, сопровождающихся изменением температуры объекта во времени, а также при проектировании и подборе соответствующего оборудования. Целью настоящей работы являлось исследование динамики теплофизических свойств плодов и ягод в процессе сублимационной сушки. В качестве объектов исследования были выбраны ирга, жимолость и брусника. Расчетным путем определены такие теплофизические свойства, как теплоемкость, температуро- и теплопроводность, а также плотность при различном содержании влаги в продукте. Для свежемороженых плодов и ягод на начальном этапе сублимационной сушки плотность для ирги, брусники и жимолости составляла 982, 984 и 911 кг/м³ соответственно. К концу сублимационной сушки плотность ягод снижалась для жимолости, ирги и брусники на 47, 34 и 22 % соответственно. Наблюдается линейная зависимость между теплоемкостью и содержанием влаги продукта. Величина теплоемкости свежемороженых и сухих плодов и ягод лежала в интервалах 2032÷2144 кДж/(кг·К) и 1123÷1141 кДж/(кг·К). Теплопроводность свежемороженых дикорастущих ягод составляла 1,90÷1,97 Вт/(м·К) для жимолости и брусники и 1,70 Вт/(м·К) для ирги. При сублимационной сушке до достижения содержания влаги 5 % теплопроводность обезвоженных ягод находилась в интервале 0,156÷0,162 Вт/(м·К). Для брусники и ирги наибольшая теплопроводность наблюдалась на начальном

этапе сушки при наибольшем содержании влаги и составляла $(9,04\div 9,84)\cdot 10^{-7}$ м²/с. Что касается ягод жимолости, то для них максимум температуропроводности приходится при содержании влаги порядка 60 % и составляет $10,57\cdot 10^{-7}$ м²/с. По полученным зависимостям теплофизических свойств от содержания влаги были получены уравнения регрессии.

Ключевые слова: ирга, жимолость, брусника, теплофизические свойства, плотность, сублимационная сушка.

Knowledge of thermophysical properties is necessary in the calculation of technological processes, accompanied by changes in the temperature of the object in time but also in the design and selection of appropriate equipment. The aim of this work was to study dynamics of thermal properties of fruit and berries in the freeze-drying process. As objects of the study were selected shadberry, honeysuckle and cowberry. Thermophysical properties such as heat capacity, temperature and thermal conductivity, and density at various moisture contents in the product were determined by calculation. For fresh frozen fruit and berries at the initial stage of freeze-drying density to saskatoon, cranberry and honeysuckle it was 982, 984 and 911 kg/m³ respectively. By the end of the sublimation drying, the density of the berries decreased to honeysuckle, amelanchier, and cranberries in 47, 34 and 22 %, respectively. There was a linear relationship between heat capacity and moisture content of the product. The magnitude of the heat capacity of frozen and dried fruits and berries was in the intervals 2032÷2144 kJ/(kg·K) and 1123÷1141 kJ/(kg·K). The

thermal conductivity of frozen wild berries amounted to $1.90 \div 1.97 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for honeysuckle and cowberry and $1.70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for Saskatoon. When freeze-dried to achieve moisture content of 5% the thermal conductivity of dehydrated berries was in the range of $0.156 \div 0.162 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. For cranberries and saskatoon the highest conductivity was observed at the initial stage of drying when the greatest moisture content and was $(9.04 \div 9.84) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. as for the berries of the honeysuckle, the maximum of the thermal conductivity when the moisture content of about 60% to $10,57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. According to the obtained dependencies of thermal properties on moisture content were obtained from the regression equation.

Keywords: saskatoon, honeysuckle, lingonberry, thermophysical properties, density, freeze-drying.

Введение. При расчете технологических процессов линий пищевых производств, сопровождающихся охлаждением, нагреванием и замораживанием, а также при подборе и проектировании соответствующих аппаратов необходимо знать об изменениях теплофизических характеристик продуктов [1, 2]. К числу таких характеристик относят теплоемкость, тепло- и температуропроводность.

В процессе сублимационной сушки происходит ряд изменений по температурным полям в продукте, поскольку в данном случае имеют место как процессы замораживания, так и сублимации и нагрева (на этапе досушивания) [3]. Поэтому для моделирования процессов сублимационного обезвоживания пищевых продуктов, с целью разработки эффективной технологии сушки, необходима достоверная информация об изменениях теплофизических свойств продукта в процессе удаления из него влаги в соответствующем температурном диапазоне.

Цель работы. Исследование динамики изменения теплофизических показателей продукта в процессе сублимационного обезвоживания.

В качестве **объектов исследования** выступали плоды и ягоды ирги, жимолости и брусники.

Результаты и их обсуждение. Теоретические значения теплофизических характеристик определялись расчетным путем исходя из соответствующих характеристик отдельных компонентов, входящих в состав исследуемых плодов и ягод.

Поскольку в реальных условиях в процессе удаления влаги внутри ягод формируются воздушные микроструктуры, в значительной степени влияющие на теплофизические характеристики, то при расчете также учитывался данный фактор по величине усадки продукта в процессе сублимационной сушки, который был определен экспериментально и составлял от 4 до 9 % для различных видов ягод.

Плотность плодов и ягод определяли по следующей формуле [4]:

$$\rho = \sum_{k=1}^n \chi_k / \sum_{k=1}^n \frac{\chi_k}{\rho_k}, \quad (1)$$

где χ_k – массовая доля компонента;

ρ_k – плотность компонента.

Результаты расчетов изменения плотности плодов и ягод по мере сублимационной сушки представлены на рисунке 1.

На начальном этапе сублимационной сушки для свежемороженых плодов и ягод плотность для ирги, брусники и жимолости составляла 982, 984 и 911 $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно. К концу сублимационного обезвоживания плотность ягод снижалась: для жимолости, ирги и брусники на 47, 34 и 22 % соответственно.

Удельную теплоемкость ягод рассчитывали по формуле в соответствии с правилом аддитивности

$$c = \sum_{k=1}^n (c_k \chi_k), \quad (2)$$

где c_k – теплоемкость компонента.

Графики теплоемкости плодов и ягод изображены на рисунке 2.

Наблюдается линейная зависимость между теплоемкостью и содержанием влаги продукта. Величина данного параметра свежемороженых и сухих плодов и ягод находилась в интервалах $2032 \div 2144 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ и $1123 \div 1141 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

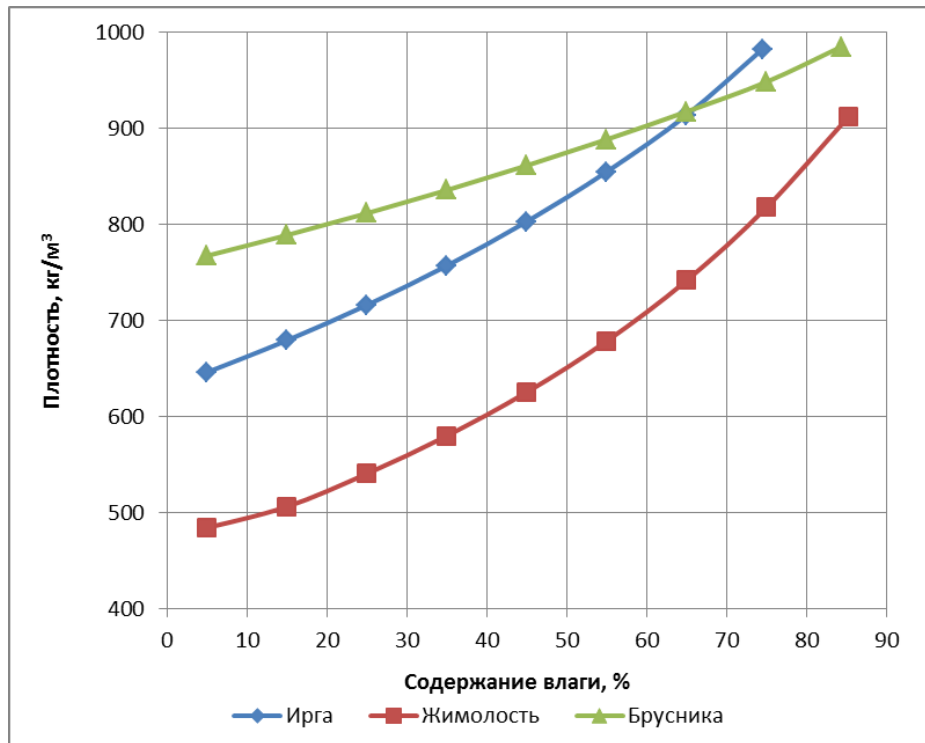


Рис. 1. Расчетная плотность ирги, жимолости и брусники при сублимационной сушке

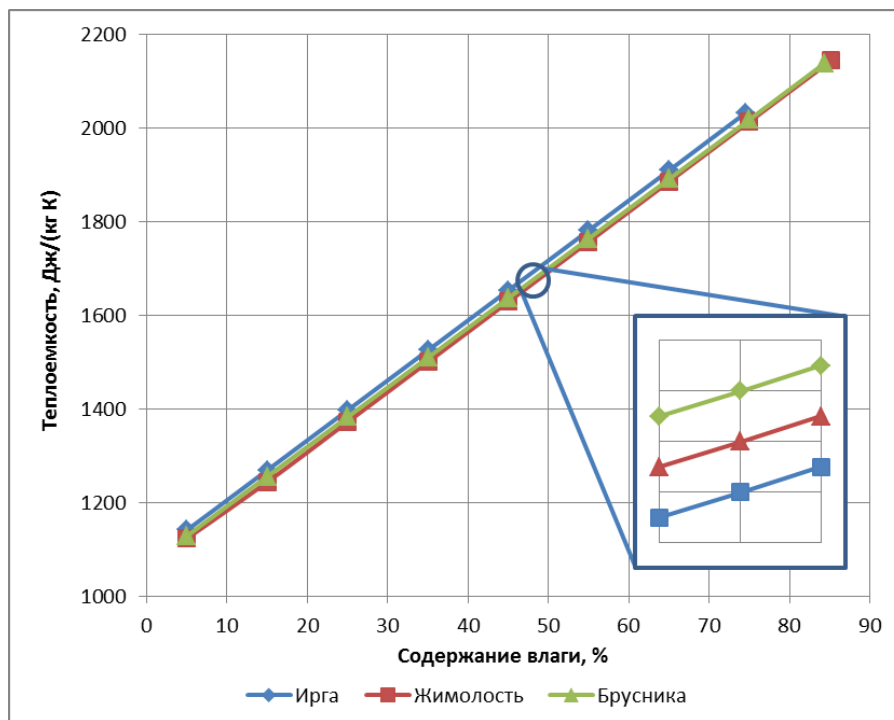


Рис. 2. Расчетная теплоемкость ирги, брусники и жимолости при сублимационной сушке

Для определения коэффициента теплопроводности был также использован метод аддитивности. Для расчета данной величины этот метод обеспечивает достаточную степень точ-

ности для пищевых продуктов [5]. В данном случае использовалась формула Лихтнекера

$$\lambda_{эф} V = \sum_{k=1}^n \lambda_k V_k, \quad (3)$$

где $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности продукта;

λ_k – коэффициент теплопроводности компонента;

V_k – объем, занимаемый компонентом;

V – полный объем продукта.

Результаты расчетов теплопроводности приведены в виде графиков на рисунке 3.

Между теплопроводностью и содержанием влаги также наблюдается линейная зависимость. Схожие значения теплопроводности между различными плодами и ягодами, по всей видимости, обусловлены приблизительно одинаковым содержанием влаги и количеством образующегося воздуха микропор в процессе суш-

ки. Теплопроводность свежемороженов плодов и ягод составляла $1,90 \div 1,97$ Вт/(м·К) для жимолости и брусники и $1,70$ Вт/(м·К) для ирги. При сублимационной сушке до достижения содержания влаги порядка 5 % теплопроводность обезвоженных плодов и ягод находилась в интервале $0,156 \div 0,162$ Вт/(м·К).

Расчетная температуропроводность определялась по следующей формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (4)$$

На рисунке 4 представлены графики температуропроводности исследуемых плодов и ягод.

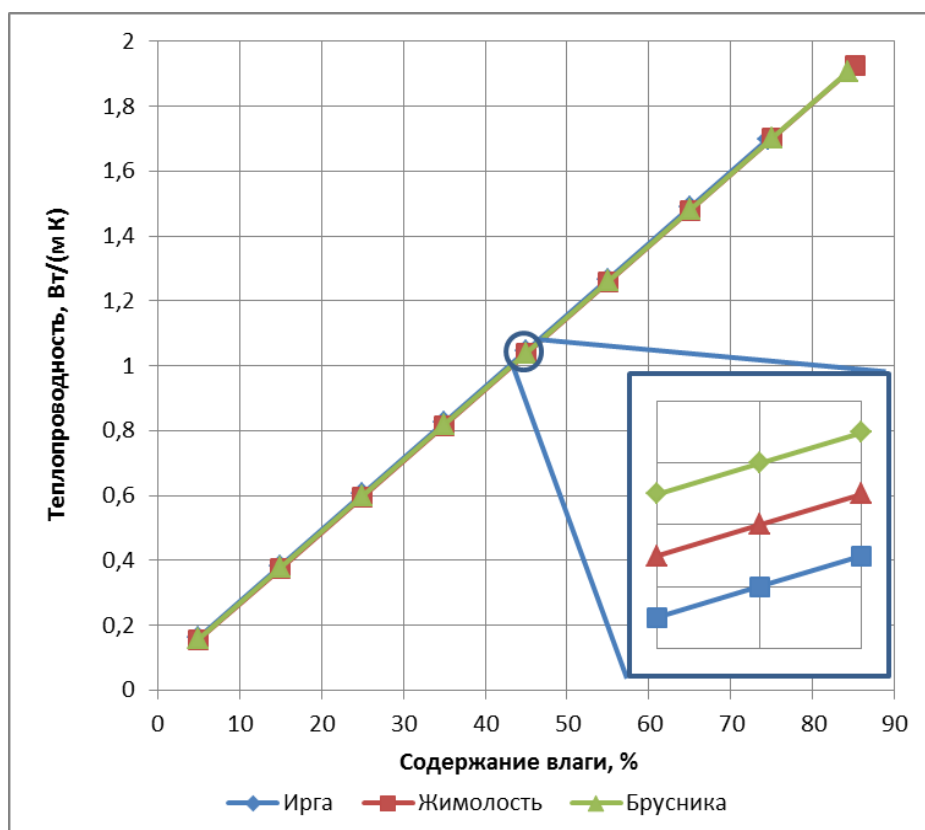


Рис. 3. Расчетная теплопроводность ирги, брусники и жимолости при сублимационной сушке

Из полученных графиков следует, что для некоторых видов продукта характерно определенное значение содержания влаги, при котором наблюдается максимум температуропроводности. Это объясняется тем, что по мере удаления влаги из плодово-ягодного сырья происходит снижение величин теплопроводности, теплоемкости и плотности, при этом скорость изменения последней характеристики для

большинства видов плодов и ягод по мере удаления влаги снижается. Чем больше исходное значение плотности продукта и, соответственно, больше линейная зависимость между плотностью и содержанием влаги, тем менее выражен максимум температуропроводности.

Для брусники и ирги наибольшая температуропроводность наблюдалась на начальном этапе сушки при наибольшем содержании влаги и

составляла $(9,04 \div 9,84) \cdot 10^{-7}$ м²/с. Что касается ягод жимолости, то для них максимум темпера-

туропроводности приходится при содержании влаги порядка 60 % и составляет $10,57 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

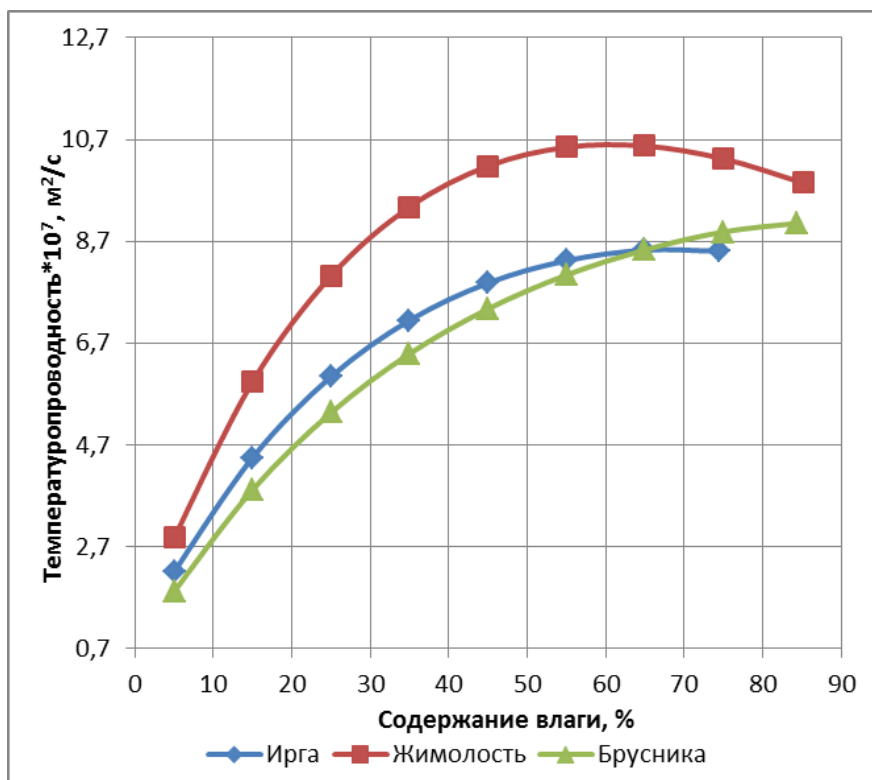


Рис. 4. Расчетная температуропроводность ирги, брусники и жимолости при сублимационной сушке

По графикам, представленным на рисунках 1–4, были получены следующие уравнения:

Для ягод ирги:

$$\begin{cases} \rho = 0,03x_6^2 + 2,3775x_6 + 635,83; R^2 = 0,9996; \\ c = 12,824x_6 + 1076,7; R^2 = 1; \\ \lambda = 0,0221x_6 + 0,0522; R^2 = 1; \\ a = 1 \cdot 10^{-5}x_6^3 - 0,0035x_6^2 + 0,2843x_6 + 0,8885; R^2 = 0,9999. \end{cases} \quad (5)$$

Для ягод жимолости:

$$\begin{cases} \rho = 0,0449x_6^2 + 1,1893x_6 + 479,77; R^2 = 0,9994; \\ c = 12,786x_6 + 1054,5; R^2 = 1; \\ \lambda = 0,0221x_6 + 0,0442; R^2 = 1; \\ a = 2 \cdot 10^{-5}x_6^3 - 0,005x_6^2 + 0,3898x_6 + 1,0932; R^2 = 0,9997. \end{cases} \quad (6)$$

Для ягод брусники:

$$\begin{cases} \rho = 0,0099x_6^2 + 1,811x_6 + 759,26; R^2 = 0,9996; \\ c = 12,726x_6 + 1064,7; R^2 = 1; \\ \lambda = 0,0221x_6 + 0,0473; R^2 = 1; \\ a = -0,0012x_6^2 + 0,1962x_6 + 1,0381; R^2 = 0,9978. \end{cases} \quad (7)$$

Выводы. Таким образом, расчетным путем были определены основные теплофизические показатели при сублимационной сушке плодов и ягод, а также получены соответствующие уравнения, которые имеют теоретическую и практи-

ческую ценность для работников пищевой промышленности. Полученные результаты исследований могут быть полезны при разработке соответствующих технологий переработки плодово-ягодного сырья.

Литература

1. Короткий И.А. Теплофизические характеристики ягод облепихи // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 2. – С. 287–290.
2. Короткий И.А. Применение метода двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик твердых, жидких и сыпучих материалов // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 2. – С. 37–41.
3. Короткий И.А., Расщепкин А.Н., Федоров Д.Е. Подбор температурных режимов сублимационной сушки ягод облепихи // Государство, академическая наука и высшая школа:

- современное состояние и тенденции развития: сб. науч. ст. – Уфа, 2015. – С. 141–144.
4. *Короткий И.А.* Исследование и разработка технологий замораживания и низкотемпературного хранения плодово-ягодного сырья Сибирского региона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04. – Кемерово, 2009. – 410 с.
 5. *Латышев В.П., Цирульникова Н.А.* Стандартизация данных о теплофизических свойствах пищевых продуктов и материалов // Холодильная техника. – 1986. – № 4. – С. 46–47.
 - определения теплофизических характеристик твердых, жидких и сypyчих материалов // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 2. – С. 37–41.
 3. *Korotkij I.A., Rasshhepkin A.N., Fedorov D.E.* Podbor temperaturnyh rezhimov sublimacionnoj sushki jagod oblepihi // Gosudarstvo, akademicheskaja nauka i vysshaja shkola: sovremennoe sostojanie i tendencii razvitija: sb. nauch. st. – Ufa, 2015. – С. 141–144.
 4. *Korotkij I.A.* Issledovanie i razrabotka tehnologij zamorazhivaniya i nizkotemperaturnogo hranenija plodovo-jagodnogo syr'ja Sibirskogo regiona: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.18.04. – Kemerovo, 2009. – 410 s.
 5. *Latyshev V.P., Cirul'nikova N.A.* Standartizacija dannyh o teplofizicheskikh svojstvah pishhevyyh produktov i materialov // Holodil'naja tehnika. – 1986. – № 4. – С. 46–47.

Literatura

1. *Korotkij I.A.* Teplofizicheskie harakteristiki jagod oblepihi // Vestnik KrasGAU. – 2008. – № 2. – С. 287–290.
2. *Korotkij I.A.* Primenenie metoda dvuh temperaturno-vremennyh intervalov dlja



УДК 637.35.04

Е.А. Равнюшкин

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ И ПОРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЯГКИХ СЫРОВ

Е.А. Ravnyushkin

MICRO STRUCTURAL AND POROMETRIC ANALYSIS OF SOFT CHEESES

Равнюшкин Е.А. – асп. каф. теплохладотехники Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета), г. Кемерово. E-mail: ravnushkin@rambler.ru

Ravnyushkin E.A. – Post-Graduate Student, Chair of Heating Ventilation and Air Conditioning, Kemerovo Technology Institute of Food Industry (University), Kemerovo. E-mail: ravnushkin@rambler.ru

Данная работа направлена на изучение микроструктуры мягких сыров и ее изменения после баровакуумной сушки. В качестве объектов исследования были выбраны следующие сыры: «Адыгейский», «Рокфор» и «Русский камамбер». Представлены фотографии микроструктуры сыров, полученные с помощью электронно-сканирующего микроскопа до и после обезвоживания. Проанализировано расположение и размер отдельных компонентов сыра по полученным фотографиям. Установлены размеры жировых глобул, которые для свежего продукта составили: до 500 мкм у сы-

ра «Адыгейский», до 200 мкм у сыра «Рокфор» и до 250 мкм у сыра «Русский камамбер». Проанализировано влияние сушки на микроструктуру мягких сыров. Обнаружено, что наибольшим изменениям подвергается структура сыра «Русский камамбер». После обезвоживания у данного сыра структура становится хаотичной, образуется множество беспорядочно расположенных микропустот, жировые глобулы образуют крупные конгломераты без четко выделенных границ. Проведен порометрический анализ на анализаторе удельной поверхности и пористых систем, получена со-