

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШОКОЛАДА

К. С. Рушинская

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Экспериментально исследованы теплофизические и реологические свойства пяти сортов шоколада, отличающихся содержанием общего сухого остатка какао. Термический анализ выполнен на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1 Phoenix®. Вязкость и реологические свойства исследовались с помощью реометра Physica MCR 501 (Anton Paar Ltd). Определены температуры плавления и их зависимость от концентрации сухого остатка. Измерены кривые течения и зависимости вязкости от скорости сдвига. Выполнены аппроксимации реограмм и кривых течения.

Ключевые слова: шоколад, калориметрия, реология

EXPERIMENTAL RESEARCH OF RHEOLOGICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CHOCOLATE

K. S. Rushinskaya

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

Thermophysical and rheological properties of the five types of chocolate which differ with total cacao solids content have been researched experimentally. Thermal analysis has been executed on the differential scanning calorimeter DSC 204 F1 Phoenix®. Viscosity and rheological properties have been investigated by means of the rheometer Physica MCR 501 (Anton Paar Ltd). Melting points and their dependence on the cacao solids concentration have been determined. Flow curves and viscosity dependence on shear rate have been measured. Approximations of the rheograms and the flow curves have been made.

Keywords: chocolate, calorimetry, rheology

Введение. Шоколад представляет собой многофазную суспензию масла какао с дисперсными твердыми веществами: какао, сахаром, порошковым молоком. Процессы образования шоколадных масс определяются кинетикой взаимодействия частиц дисперсной фазы через прослойки дисперсионной среды. Величина этих взаимодействий, т.е. число и прочность связей, возникающих между твердыми частицами в единице объема системы, определяет ее структурно-механические и теплофизические свойства, от которых зависят технологические свойства дисперсной системы, а также качество готового продукта [1].

Объекты исследования. В работе исследовано пять образцов шоколада, отличающихся содержанием общего сухого остатка какао. В качестве характеристик образцов использовались данные, указанные производителем (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики исследуемых сортов шоколада

Номер образца	Содержание общего сухого остатка какао, %
1 (молочный)	6
2 (темный)	41
3 (горький)	55
4 (горький)	73
5 (горький)	75

следуемого образца, определять изобарную теплоемкость, а также находить фазовые переходы, если они имеют место.

Теплофизические измерения проводились на дифференциальном сканирующем калориметре теплового потока DSC 204 F1 Phoenix (производство фирмы Netzsch, Германия) [2]. В процессе приготовления образцов порошок шоколада помещался в специальный алюминиевый тигель. Масса образцов измерялась с помощью аналитических весов ЛВ-210-А 2-го класса точности. Далее с помощью специального пресса методом холодной сварки тигель запечатывался, после чего помещался в рабочую камеру калориметра, и проводилось измерение ДСК-кривой. Все измерения выполнены со скоростью нагрева/охлаждения 2 К/мин.

Для определения реологических характеристик исследуемых образцов использовалась система «плита-плита». Диаметр плиты $d = 50$ мм, величина измерительного зазора – 3 мм. Для поддержания и изменения температурного режима использовалось специальное температурное устройство Н-PTD 200 на основе эффекта Пельтье.

В ходе эксперимента на рабочую поверхность плиты реометра помещалось около 1 г образца. Далее задавались начальное и конечное значения скорости сдвига, время эксперимента, необходимый температурный режим и метод испытания (вращение или осцилляции). Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью программной оболочки реометра, которая содержит все необходимые опции для обработки полученных результатов [3].

Результаты измерений. Типичные ДСК-кривые исследуемых образцов показаны на рис. 1. Пики, характерные для этих кривых, соответствуют процессу плавления шоколада. Прибор DSC 204 F1 поставляется с программным обеспечением Proteus® Software. Программа включает все необходимые опции для проведения измерения и обработки полученных результатов, в том числе сложный анализ полученных экспериментальных данных. На рис. 1 показан пример обработки параметров процесса плавления для образца № 4. На рис. 2 приведены основные характеристики процесса плавления шоколада в зависимости от концентрации сухого остатка какао: температуры начала плавления, пика плавления, конца плавления.

Приборы и методика исследования.

Термический анализ (калориметрия) – метод исследования физико-химических процессов, основанный на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих превращения веществ в условиях программного изменения температуры. Этот метод позволяет фиксировать кривые нагревания/охлаждения (зависимости теплового потока от температуры) ис-

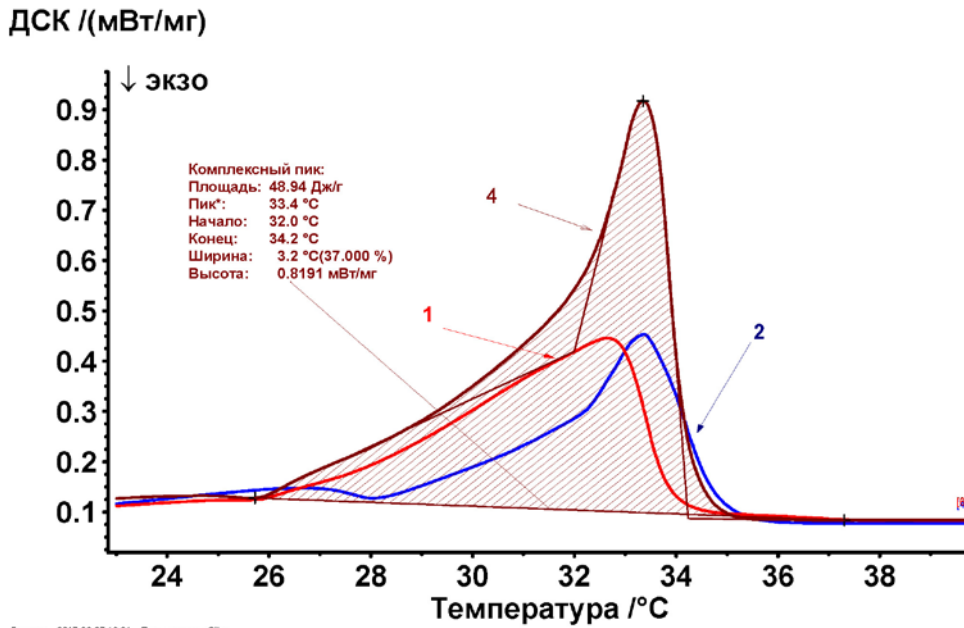


Рис. 1. Примеры кривых ДСК для различных сортов шоколада

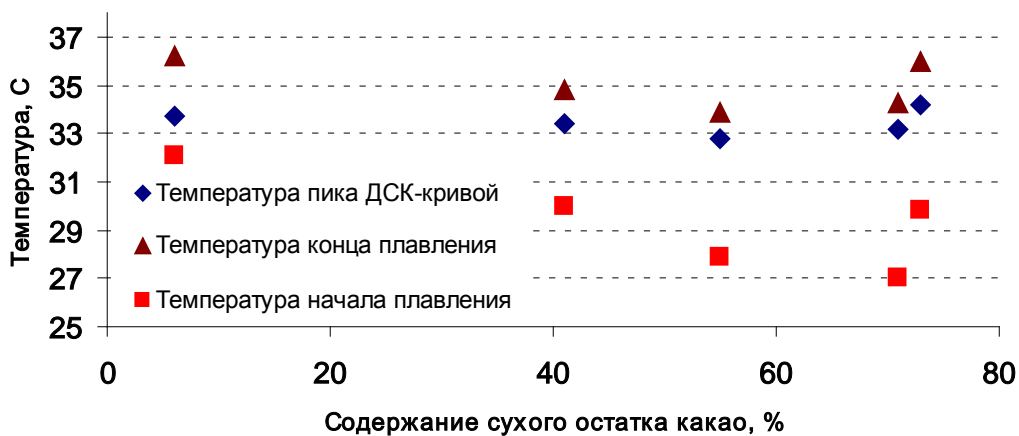


Рис. 2. Примеры кривых ДСК в зависимости от содержания сухого остатка какао

Видно, что по мере увеличения концентрации сухого остатка какао φ температурные характеристики плавления уменьшаются, но при $\varphi > 70\%$ – увеличиваются. Это может быть обусловлено пониженным содержанием сухого молока и жиров, а также степенью дисперсности какао-бобов в качественных сортах шоколада.

Важнейшими технологическими показателями шоколадных масс являются их реологические свойства. С одной стороны, качество шоколадной массы коррелирует с точно определяемыми реологическими величинами, такими как вязкость, предел текучести и модуль упругости. Однако оно также оценивается эмпирическими величинами, которые определяют качественными методами измерений.

На рис. 3 показаны типичные зависимости эффективной вязкости η от скорости сдвигового течения $\dot{\gamma}$. Измерения выполнены в режиме контролируемой скорости сдвига (SR–режим).

Как видно из рисунка, все образцы являются неньютоновскими жидко-

стями. При высоких скоростях сдвига в исследуемых продуктах проявляются эффекты изменения структуры и ориентации.

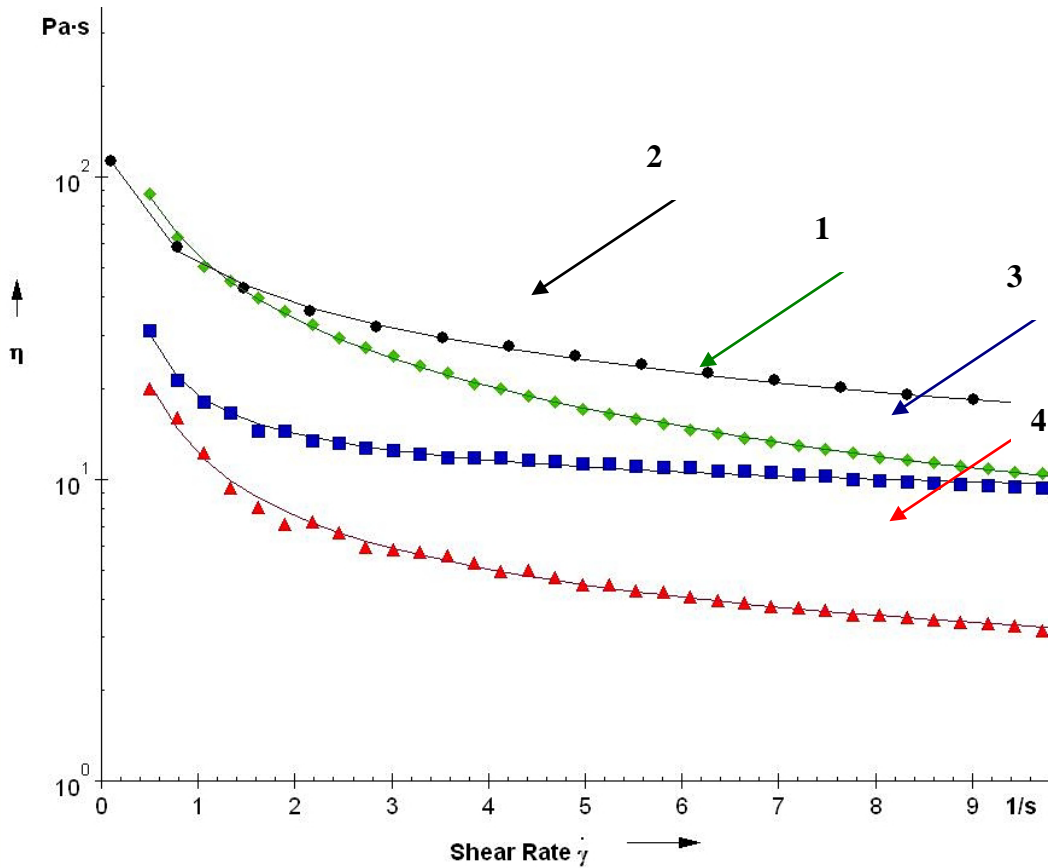


Рис. 3. Зависимость вязкости от скорости сдвига для различных сортов шоколада

Обработка результатов измерений выполнена с помощью уравнения Виноградова-Малкина (на рис. 3 – сплошные линии) [3]:

$$\eta = \frac{\eta_0 - \eta_{inf}}{1 + a \dot{\gamma}^p + b \dot{\gamma}^{2p}} + \eta_{inf}.$$

Уравнение Виноградова-Малкина описывает кривую вязкости материала с вязкостью при нулевом сдвиге и областью разжижения при сдвиге. Результаты аппроксимации представлены в табл. 2. Коэффициент достоверности R^2 – не менее 0.99.

Табл. 2. Значения коэффициентов в уравнении Виноградова-Малкина для различных сортов шоколада

	1	2	3	4	5
$\eta_0 - \eta_{inf}$	1500.3	245.94	-0.03993	0.0061435	-7141.9
η_{inf}	$1.2167 \cdot 10^{-6}$	$1.453 \cdot 10^{-6}$	$1.1059 \cdot 10^{-6}$	0.011987	5.2625
a	10.796	0.97222	-1.8959	-2.0361	-165.78
b	15.504	2.7631	0.89379	1.0366	1.4211
p	0.44206	0.30372	0.01	0.01	0.89474

Список литературы

1. *Zubchenko A. V., Cherpakov V. P., Kopenkina I. N.* Issledovanie fizicheskikh svojstv kakao masla metodom vnutrennego trenija //Izvestija vuzov SSSR. Pishhevaja tehnologija. 1982. № 1. P. 124–126.
2. Дифференциальный сканирующий калориметр теплового потока DSC 204 F1 Phoenix®. Руководство по эксплуатации. 2006. 71 с.
3. Anton Paar Germany GmbH. Руководство по эксплуатации. Программное обеспечение RheoPlus. Т. 3. Анализ. 2005. 230 с.