

УДК 536.24

## ЭКСЕРГИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНИУК В. Н., асп. МУСЛИНА Д. Б.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: Dasha106515@gmail.com

Решена задача определения эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов на базе термодинамического анализа соответствующих технических систем. Эксергетический метод позволяет произвести оценку энергетической эффективности для наиболее проблемных теплотехнологических систем преобразования вещества и наметить пути снижения энергетической составляющей себестоимости продукции. Актуальность проблемы обусловливается известным изменением ситуации на мировом энергетическом рынке и обострена необходимостью сохранить и наращивать экспортный потенциал легкой промышленности как важной составляющей народнохозяйственного комплекса республики. Эксергетический метод известен достаточно давно, интерес к нему проявляется и затухает с периодичностью смены поколений исследователей. Охлаждение к указанному методу каждого нового поколения объясняется чаще всего нерешенностью задачи расчета эксергии различных материалов, что создает проблему в ходе анализа систем преобразования вещества. Обозначенная задача, как правило, не представляет трудности для систем преобразования энергии, но для систем преобразования вещества ситуация намного сложнее. Это связано, прежде всего, с многообразием материалов и соответственно особенностями определения такой компоненты эксергии вещества в потоке, как химическая составляющая. Отсутствие решения нахождения химической составляющей эксергии вещества не позволяет в полном объеме провести термодинамическую оценку энергообеспечения теплотехнологического процесса, без чего усложняются и принятие решений, и определение путей снижения энергопотребления. Все изложенное актуально для текстильной индустрии и, прежде всего, для отделочных производств.

Представлено решение задачи расчета эксергии вещества в потоке для наиболее распространенных типов волокон – натуральных волокон животного и растительного происхождения, а также искусственных волокон. Причем для различных красителей – основных, кислотных и дисперсных. Рассмотрены составляющие эксергии вещества: реакционная, концентрационная и термомеханическая, представлены их расчет, соотношение и погрешность определения. Приведены примеры и результаты расчетов эксергии упомянутых окрашенных материалов.

**Ключевые слова:** эксергия текстильных материалов, эксергия вещества в потоке, термомеханическая, концентрационная, реакционная составляющие удельной массовой эксергии.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 41 назв.

## EXERGY OF TEXTILE MATERIALS

ROMANIUK V. N., MUSLINA D. B.

*Belorussian National Technical University*

The article presents solution for the task of evaluating exergy of the substance in the flow for textile and woven fabrics based on thermodynamic analysis of the corresponding technical systems. The exergy method allows estimating the energy effectiveness for the most proble-

matic heat-technological systems of substance transformation and thus outlining the ways for decreasing the electric-power component in the production prime cost. The actuality of the issue stems from the renowned scenario alteration on the world energy market and is aggravated by necessity of retaining and building up the export potential of the light industry as an important component of the republic national-economic complex. The exergy method has been here for quite a long time and saw the interest fading and appearing again with periodicity of the research-generations alternation. Cooling down of every new generation towards the specified method is explained mostly by unresolved problem of the exergy evaluation for diverse materials, which poses a problem in the course of analysis of the substance transformation systems. The specified problem as a general rule does not create obstacles for energy-conversion systems. However, the situation with substance-transformation systems is by far more complicated primarily due to diversity of the materials and respectively of the specification peculiarities of such component of the substance exergy in the flow as chemical component. Abeyance of conclusion in finding the chemical component of the substance exergy does not allow performing thermodynamic valuation of the energy provision for the heat-technological process in full measure. Which complicates the matters of decision-making and finding a medium for reduction of their energy consumption. All stated above relates to the textile industry and in the first instance to the finishing production departments.

The authors present the exergy-evaluation problem solution for the substance in the flow for the most common fiber-types: natural animal and phytogenic ones as well as artificial fibers. Moreover, they present the solution for different colorants – basic, acid-type, dispersed. The paper considers the following components of substance exergy: reaction, concentration, and thermomechanical with presentation of their computation, correlation, and assessment deviation. The examples and exergy-computation results of the mentioned coloured fabrics are shown.

**Keywords:** exergy of textile materials, substance exergy in the flow, thermomechanical, concentration, reaction components of the mass-flow exergy.

Fig. 1. Tab. 3. Ref.: 41 titles.

**Введение.** Важнейшей задачей, стоящей перед специалистами хозяйственного комплекса Беларуси, являются в том числе обеспечение стандарта уровня жизни населения страны [1, 2], разработка новой долгосрочной стратегии совершенствования экономики Беларуси на период до 2030–2050 гг., гармонично сочетающей инновационные и эволюционные изменения хозяйственного механизма. Чрезвычайно актуально определить тенденции дальнейшего развития промышленных предприятий непосредственно на местах, поскольку поддержка государства не может быть бесконечной. Уже к 2020 г. в мире прогнозируется резкий рост стоимости всех ресурсов, что может повлечь падение производства на фоне растущего загрязнения окружающей среды и вызванное им изменение климата [3, 4]. Разработка первоочередных мер по модернизации не только экономического механизма страны, но и каждого предприятия в отдельности в связи с грядущими изменениями на сырьевых и энергетических рынках необходима и очень своевременна. Решение этой задачи в полной мере связано с развитием отрасли легкой промышленности, продукция которой в рамках ВВП невелика (3,8 %), но значима для населения и составляет до 40 % внутреннего потребления непродовольственных товаров Беларуси [5, 6]. Кроме того, отрасль должна увеличить свой вклад в суммарный экспорт страны, который в настоящее время составляет основу экономики и доходит до 90 % всей продукции [7–9]. Продукция отрасли испытывает острейшую конкуренцию на внутреннем и внешнем рынках. Это диктует необходимость не только перманентного повышения качества, конкурентоспособности, гибкого обновления ассортимента, что отмечалось президентом Беларуси на встрече с предпринимателями 17 марта 2015 г. [10], но и снижение ее себестоимости. Здесь решения ограничены, поскольку

энергоносители, сырье и комплектующие для предприятий отрасли, как правило, импортируются и цены на них определяются внешними рынками.

Положение усугубляется тем, что в государствах СНГ не производится оборудование для легкой промышленности. Современные технологические линии и агрегаты закупаются в странах дальнего зарубежья, что связано с повышенными объемами инвестиций и как следствие со значительной долей амортизационной составляющей в себестоимости [11–13]. В этой ситуации остается ограниченное число путей для снижения себестоимости продукции отрасли: сокращать расходы на энергообеспечение предприятий и заработную плату с неизбежным ухудшением уровня жизни персонала. Поскольку последнее нежелательно, остается лишь снижать энергозатраты на обеспечение технологического процесса. Потенциал этого направления иллюстрирует пример российских предприятий, где только за счет роста тарифов на энергоресурсы за 2010–2011 гг. произошел резкий скачок энергетической составляющей себестоимости продукции с 11,8 до 14,0 % [14].

Таким образом, в условиях Беларуси основным направлением, ведущим к повышению конкурентоспособности продукции легкой промышленности, является снижение энергозатрат прежде всего за счет повышения энергоэффективности технологических процессов. Последнее требует получения объективной оценки, что возможно лишь при проведении термодинамического анализа, который наиболее компактно реализуется на базе эксергетического метода. Применение последнего осложняется трудностями нахождения эксергии тех или иных веществ, количество которых велико и связано с многообразием систем преобразования вещества. Для текстильной промышленности Беларуси обозначенная проблема актуальна в связи с необходимостью получения объективной оценки и дальнейшего совершенствования энергообеспечения теплотехнологии отделочных производств. Наиболее актуальны для текстильной промышленности натуральные (лен, хлопок, шелк, шерсть и др.) и искусственные (акрил, нейлон, полиэстер, полиамид и др.) материалы.

**Описание методики расчета составляющих эксергии вещества.** Эксергия вещества в потоке определяется тремя составляющими

$$e_{\text{матер}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}}, \quad (1)$$

где  $e_{r,\text{матер}}$ ,  $e_{k,\text{матер}}$ ,  $e_{pT,\text{матер}}$ , кДж/кг, – соответственно реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии вещества.

При этом удельную массовую эксергию будем относить к массе сухого неокрашенного материала, которым могут быть как пряжа, так и ткань. Состав материала предлагается определять на массу материала, из которого удалена вся свободная и связанная влага без гидратной (кристаллизационной) влаги, не удаляемой без разрушения химических связей в материале и самого материала [15]. В дальнейшем используется термин «сухой материал», под которым понимается материал с кристаллизационной (гидратной) влажностью.

Реакционная удельная массовая составляющая эксергии потока материала определяется соотношением

$$e_{r,\text{матер}} = \sum g_j e_{r,j}, \quad (2)$$

где  $g_j$ , доли, – массовые доли составляющих компонентов ткани или пряжи, отнесенные к массе сухого материала;  $e_{r,j}$ , кДж/кг, – реакция удельная массовая эксергия  $j$ -го компонента материала.

В общем случае текстильный материал состоит из смеси неокрашенного сухого материала, равновесной конечной и начальной или промежуточной влаги в процессе тепловлажностной обработки, красителя и текстильных вспомогательных веществ и химических реагентов в промежуточных состояниях в ходе обработки.

Реакционные составляющие эксергии компонентов  $e_{r,j}$  определяются по справочной литературе [16] либо рассчитываются по реакции девальвации [17, 18]. В случае горючих компонентов возможно рассматривать последние как топливо и использовать методику, предложенную Шаргуттом для расчета реакционной составляющей эксергии твердых топлив, твердых углеводородных соединений, базирующуюся на использовании удельной массовой высшей теплоты сгорания  $Q_B^p$ , кДж/кг [17]. Для твердых органических веществ методика модифицируется к соотношению [17, 19, 20]

$$e_{r,\text{матер}} = (Q_B^p + rW)\alpha, \quad (3)$$

где  $r$ , кДж/кг, – удельная массовая теплота парообразования воды при атмосферном давлении;  $W$ , доли, – влажность компонента на его общую массу;  $\alpha = 1,0438 + 0,0159 g_H/g_C + 0,0813 g_O/g_C$  – корреляционная поправка для твердых углеводородов с соединениями С, Н, О при условии, что  $g_O/g_C \leq 0,5$ ; или для соединений, содержащих С, Н, О, N, формула примет вид:  $\alpha = 1,0447 + 0,0140 g_H/g_C + 0,0968 g_O/g_C + 0,0467 g_N/g_C$  при условии, что  $g_O/g_C \leq 0,5$ ;  $g_H$ ,  $g_C$ ,  $g_O$ ,  $g_N$  – соответственно массовые доли в материале водорода, углерода, кислорода и азота.

Например, для хлопка и нейлона получаем удельную массовую реакционную составляющую эксергии соответственно 17,9 и 33,9 МДж/кг. Следует понимать, что данная составляющая эксергии вещества принципиально не может быть определена точно, и погрешность в 1 % в приведенной записи нужно считать минимально возможной.

Теплоту сгорания в (3) при отсутствии справочных данных можно рассчитать по известному соотношению Д. И. Менделеева, дающему более точный результат, чем соответствующее соотношение Дюлонга [21, 22]:

$$Q_H^p = 81C + 246H - 26(O - S) - 6W, \quad (4)$$

где  $Q_H^p$ , ккал/кг, – удельная массовая низшая теплота сгорания материала; С, Н, О, S, W – соответственно процентное содержание в топливе углерода, водорода, кислорода, горючей серы и влаги.

Концентрационная составляющая эксергии текстильных материалов относится лишь к тем, состав которых можно рассматривать в данном контексте как твердый раствор [17] и их разделение на компоненты связано с понятием термодинамической работы, не зависящей от давления, температуры материала и влажности окружающей среды [23]. Последнее связывает концентрационную составляющую эксергии рассматриваемых материалов с энергией адсорбции красителя на материале [24]. В случае влажного материала концентрационная составляющая связана также с энергией связи кристаллизационной (гидратной) влажности материала [25–27]. Тогда можно предложить следующую зависимость для расчета концентрационной составляющей эксергии текстильных материалов:

$$e_{к,матер} = \sum_1^{n-1} (g_j w_j), \quad (5)$$

где  $n$  – число компонентов материала (материал, влага, краситель и пр.);  $g_j$ , доли, – массовая доля компонентов материала на сухую массу (для воды  $g_j$  – гидратная влажность материала);  $w_j$ , кДж/кг, – удельная энергия адсорбции красителя материалом или энергии химической связи гидратной влаги с материалом [27].

Энергия адсорбционного взаимодействия может быть взята из соответствующих справочников [28, 29]. Энергия адсорбции для наиболее характерных пар «сорбент – сорбат» приведена в табл. 1. Значения энергии сорбции из табл. 1 имеются в [29–33] по крашению и обработке текстильных и трикотажных материалов с учетом влияния основных химических реагентов – электролитов (NaCl и NaOH) – и текстильно-вспомогательных веществ, к которым относятся поверхностно-активные вещества (ПАВ). И те и другие не связаны с концентрационной составляющей эксергии, поскольку вымываются из материала без затрат термодинамической работы.

Таблица 1

**Энергия сорбции некоторых взаимодействий текстильных материалов и красителей [32, 33]**

Наименование красителя	Энергия сорбции красителя, кДж/моль	Молярная масса красителя, г/моль	Энергия сорбции красителя, кДж/кг
<b>Прямые красители для натуральных целлюлозных волокон</b>			
Chrysophenine G (Yellow 12)	59	680,7	86,7
Durazol Fast Yellow 6g	130	485,5	267,8
Chlorazol Fast Scarlet 8B	84	902,8	93,0
Chlorazol Sky Blue FF	92	992,0	92,7
<b>Кислотные красители для искусственных волокон и волокон животного происхождения</b>			
Metanil Yellow YK (Acid Yellow 36)	38,2	375,4	101,8
Quinizarine Blue (Acid Violet 43)	38,2	240,21	159,0
<b>Дисперсные красители для крашения гидрофобных волокон (полиэфирных, полиамидных и ацетатных)</b>			
P-nitroaniline	85,4	138,7	615,9
Azobenzene	69,9	171,2	408,2
P-aminoazobenzene	99,2	182,2	544,4

Термомеханическая составляющая эксергии потока рассматриваемого материала определяется соотношением

$$e_{pT, \text{матер}} = \sum (g_j ((i_j - i_{j,0}) - T_0 (s_j - s_{j,0}) + l_j)), \quad (6)$$

где  $g_j$ , доли, – массовые доли составляющих компонентов ткани или пряжи, отнесенные к массе сухого материала в соответствии с соотношением (2);  $i_j$ ,  $i_{j,0}$ , кДж/кг, – энтальпия компонентов вещества удельная массовая;  $T_0$ , К, – температура окружающей среды;  $s_j$ ,  $s_{j,0}$ , кДж/(кг·К), – энтропия компонентов вещества удельная массовая;  $l_j$ , кДж/кг, – энергия отрыва компонента от материала, удельная массовая на килограмм компонента. Определяется с учетом каждого вида связи влаги с материалом [17, 23, 26, 27, 34].

Для численного расчета энергии отрыва влажной компоненты можно использовать методику Ребиндера [15, 27]

$$l_j = \sum_1^m l_k y_k, \quad (7)$$

где  $m$  – количество видов влаги в материале за исключением гидратной составляющей: адсорбционно-связанная, осмотически связанная, капиллярно-связанная влага;  $l_k$ , кДж/кг, – энергия связи каждого вида связи влаги в материале;  $y_k$ , доли, – массовая доля каждого вида влаги в материале по отношению к влаге материала.

В расчетах температура готового материала может изменяться в интервале до  $t_{\text{матер, макс}} = 80\text{--}120$  °С в зависимости от типа волокна. Температуру окружающей среды можно принимать  $t_0 = 20$  °С. Для расчета значений  $i_j - i_{j,0}$ ,  $s_j - s_{j,0}$  следует использовать соотношение

$$(i_j - i_{j,0}) - T_0 (s_j - s_{j,0}) = \bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{матер}}} (t_{\text{матер}} - t_0) - T_0 \ln(T_{\text{матер}} / T_0), \quad (8)$$

где  $\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{\text{матер}}}$  – удельная массовая изобарная средняя теплоемкость компонентов вещества в интервале температур  $t_0 - t_{\text{матер}}$ , кДж/(кг·К);  $T_0$ ,  $T_{\text{матер}}$ ,  $t_0$ ,  $t_{\text{матер}}$  – соответственно температуры окружающей среды, К, и материала, °С [17, 23, 34].

Удельная массовая изобарная средняя теплоемкость материала в интервале температур  $t_0 - t_{\text{матер, макс}}$  изменяется при изменении температур (в расчетах следует принимать среднюю интегральную) незначительно и в расчетах в пределах допустимой погрешности может быть принята постоянной величиной [30, 31]. Указанные значения удельной массовой изобарной теплоемкости наиболее часто встречающихся текстильных материалов в отделочном производстве приведены в табл. 2 [30–33, 35].

Таблица 2  
Удельные массовые изобарные теплоемкости некоторых текстильных материалов

Название	Теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Хлопок	1,34
Шерсть	1,38
Шелк	1,38
Полиэстер	0,84
Нейлон	2,09
Полиамид	1,13

**Результаты анализа структуры эксергии вещества текстильных и трикотажных материалов** приведем на примере характерных текстильных материалов, которыми являются хлопок как представитель натуральных целлюлозных материалов и нейлон – наиболее распространенный искусственный материал. Для хлопка принимаем основной краситель, например Chrysophenine G или Yellow 12, ( $C_{30}H_{26}N_4Na_2O_8S_2$ , табл. 1), для нейлона – дисперсный краситель – азобензол ( $C_{12}H_{10}N_2$ ).

Реакционную составляющую эксергии рассматриваемых материалов находим расчетным путем по (2), используя соотношение (3). Получаем следующие значения реакционной составляющей эксергии красителей: для Chrysophenine G – 22,6 МДж/кг, азобензола – 34,5 МДж/кг. Используемая методика дает значения, совпадающие с данными таблиц [16] для известных органических соединений, таких как анилин  $C_6H_7N$ ,  $C_6H_{12}O$  и пр. В итоге получаем следующее значение реакционной составляющей эксергии окрашенных хлопка и нейлона выбранными красителями: соответственно 18,1 и 34,9 МДж/кг. Погрешность, связанная с неопределенностью величины адсорбции (40–80 %), не превышает 1 %. Поскольку определение реакционной составляющей принципиально не может быть точным [18], полученные значения могут использоваться в проведении эксергетического анализа. В указанных значениях реакционной составляющей эксергии окрашенных материалов вклад основного материала составляет: для хлопка – 98,9 %, для нейлона – 96,9 %. Таким образом, определяющим является нахождение реакционной составляющей основного материала.

Концентрационная составляющая находится из (5), данных табл. 1 и приведенных долей компонентов окрашенного материала (табл. 3).

Таблица 3

Состав окрашенного материала на сухую массу

Материал	Процент компонента в окрашенном материале	
	Хлопок	Нейлон
Основной материал	100	100
Влага, в том числе гидратная	8 <0,01	4 <0,01
Краситель	0,6–1,2	2,1–4,2

Энергия химической связи влаги находится в диапазоне от 1 до  $10^7$  кДж/кмоль [25]. Максимальная величина рассматриваемой составляющей не превышает 0,06 кДж/кг. С учетом количества гидратной влаги в материале вклад ее в концентрационную составляющую эксергии и в конечном итоге эксергию вещества оказывается меньшим погрешности исходных данных и расчетов, поэтому этой компонентой концентрационной составляющей можно пренебречь. Кроме того, данная составляющая оказывается транзитной, что при использовании соответствующей методики оценки термодинамической эффективности автоматически исключается из результата.

Получаем следующие результаты концентрационной составляющей эксергии для окрашенных: хлопка  $e_{к,хл} = 0,52–1,04$  кДж/кг, нейлона

$e_{к,н} = 8,50-17,0$  кДж/кг в зависимости от доли красителя в окрашенном материале.

Термомеханическую составляющую рассчитываем для параметров: температура 40 °С, давление атмосферное. Параметры окружающей среды: температура 20 °С, давление атмосферное 745 мм рт. ст., влажность относительная 70 %. Теплоемкости материалов приведены в табл. 1. Для красителя нейлона удельную массовую изобарную теплоемкость для азобензола находим в справочнике Б. П. Никольского [36]; она равна  $0,330$  ккал/(кг·°С) =  $1,38$  кДж/(кг·°С). В отношении Yellow 12, используемого в роли красителя хлопка, ситуация менее определенная. Поскольку данный краситель не включен в известные справочные материалы, можно применить следующее решение.

Диапазон изменения массовой доли красителя в целлюлозных натуральных материалах можно рассчитать исходя из доли адсорбции красителя волокнами из раствора 40–80 % [37, 38] и рецептов расхода красителей. Тогда содержание рассматриваемого красителя в хлопковом материале составляет 6–12 г на килограмм сухого материала, или 0,6–1,2 % [39, 40]. Теплоемкость красителей данной группы находится на уровне  $2,0$  кДж/(кг·°С), а погрешность в этом случае составляет 50 %. При теплоемкости хлопка  $1,34$  кДж/(кг·°С) получаем диапазон изменения теплоемкости окрашенного материала  $1,98-2,00$  кДж/(кг·°С). Таким образом, погрешность составляет до 1 % и не превышает погрешности определения основного материала – хлопка. Это отвечает требованиям расчета эксергии для рассматриваемого случая анализа работы установок.

Энергия отрыва влаги в материале изменяется для того или иного вида связи и находится в пределах 11–152 кДж/кг для капиллярной составляющей влаги в зависимости от температуры и эквивалентного диаметра капилляра [27]. Количеством капиллярной влаги в большинстве случаев (при малых и умеренных значениях относительной влажности окружающей среды) можно пренебречь и считать, что процесс лежит в сугубо адсорбционной области [27]. Таким образом, в расчетах принимаем энергию связи влаги в материале, равной адсорбционной составляющей, и находим ее в справочных данных [15, 25, 27]. В рассматриваемом примере для хлопка энергия отрыва адсорбционной влаги в материале составит  $24,457$  кДж/кг, для нейлона  $24,452$  кДж/кг, т. е. изменение величины энергии отрыва для различных видов тканей и пряжи не превышает погрешности определения. С учетом массовой доли влаги, отнесенной к массе сухого материала, величина данного компонента в термомеханической составляющей эксергии материала составит  $1,96$  кДж/кг для хлопка и  $0,98$  кДж/кг для нейлона соответственно.

С учетом изложенного находим термомеханическую составляющую эксергии окрашенных хлопка и нейлона указанными красителями. Для хлопка она составит  $3,25-3,26$  кДж/(кг·°С) в зависимости от доли красителя в пределах указанного диапазона адсорбции 40–80 %. Для нейлона, окрашенного азобензолом, получаем с учетом рецептурного расхода красителя  $52$  г/кг и изменения величины адсорбции в диапазоне 40–80 % значение



термомеханической составляющей 2,77–2,81 кДж/(кг·°С). Таким образом, значения эксергии составят:

- для окрашенного хлопка

$$e_{\text{хл}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}} = 18,1 \cdot 10^3 + 3,26 + 1,04 = 18,1 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

- для окрашенного нейлона

$$e_{\text{н}} = e_{r,\text{матер}} + e_{pT,\text{матер}} + e_{k,\text{матер}} = 34,9 \cdot 10^3 + 2,81 + 17,0 = 34,9 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}.$$

Из полученных результатов следует, что доминирующей составляющей, на 2–4 порядка превышающей прочие слагаемые эксергии текстильных окрашенных материалов, является реакционная составляющая. Она остается транзитной при проведении технологических операций в рассматриваемых системах, и в этой связи следует исключить ее влияние на оценку энергетической эффективности процесса (рис. 1) [41].



Рис. 1. Схема эксергетических потоков технической системы

Результаты будут иметь невысокую наглядность, если структурой эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов пренебречь и использовать оценку с помощью степени термодинамического совершенства технической системы:

$$\nu = \sum E'' / E' = 1 - \sum D / \sum E'. \quad (9)$$

Для получения требуемой информативности целесообразно использовать оценку, например, с помощью термодинамического КПД

$$\eta_e = (\sum E'' - E^{tr}) / (\sum E' - E^{tr}) = 1 - \sum D / (\sum E' - E^{tr}) = E_{исп} / E_{расп}, \quad (10)$$

в совокупности со степенью технологического совершенства

$$\beta = \sum E_{расп} / E' = 1 - \sum E^{tr} / \sum E', \quad (11)$$

либо степенью полного совершенства технической системы [20]

$$\mu = \sum E_{исп} / E' = 1 - (\sum E^{tr} + \sum D) / \sum E'. \quad (12)$$

Составляющие формул (9)–(11) пояснены на рис. 1.

Концентрационная составляющая эксергии вещества в потоке для рассматриваемых материалов наименее значима, ее величина на два порядка уступает ближайшей по значению термомеханической составляющей. Это позволяет определять концентрационную составляющую эксергии рассматриваемых веществ приближенно, поскольку погрешность нахождения данной составляющей не должна оказать влияния на конечную оценку при должном выборе алгоритмов проведения расчетов. В некоторых случаях, видимо, будет допустимо исключить концентрационную составляющую данных материалов из анализа технических систем, считая ее неизменной и транзитной.

## ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ структуры эксергии наиболее распространенных текстильных материалов.
2. Выявлена большая разность значений составляющих эксергии вещества в потоке для текстильных и трикотажных материалов, что предполагает использование эксергетической оценки технических систем с использованием понятий транзитной эксергии.
3. Предлагается методика расчета эксергии текстильных и трикотажных материалов, которую можно применить для термодинамического анализа теплотехнологий легкой промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С а в к о, С. Правительство одобрило Национальную стратегию социально-экономического развития Беларуси до 2030 г. [Электронный ресурс] / С. Савко // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Belarusi-do-2030-goda\\_i\\_694751.html](http://www.belta.by/ru/all_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Belarusi-do-2030-goda_i_694751.html). – Дата доступа: 11.02.2015.
2. К а к о й будет Беларусь в 2030 г.? [Электронный ресурс] // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu\\_i\\_687128.html](http://www.belta.by/ru/all_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu_i_687128.html). – Дата доступа: 11.02.2015.
3. П р о р о к о в, Н. «Пределы роста»: мир приближается к коллапсу [Электронный ресурс] // Theory&Practice. – Режим доступа: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta>. – Дата доступа: 11.09.2014.
4. М е д о у з, Донелла. Пределы роста. 30 лет спустя / Донелла Медоуз, Й. Рандерс, Деннис Медоуз. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 342 с.
5. О б и т о г а х социально-экономического развития отрасли за 2012 г. и поставленных задачах перед концерном «Беллепром» на 2013 г. [Электронный ресурс] // Белле-

пром. – Режим доступа: <http://www.bellegprom.by/print/press/news/ed8bd62b6fbba0c.html>. – Дата доступа: 01.10.2014.

6. К о м п л е к с н а я программа развития легкой промышленности Республики Беларусь на 2011–2015 гг. с перспективой до 2020 г. [Электронный ресурс] // Беллепром. – Режим доступа: <http://www.bellegprom.by/programs>. – Дата доступа: 02.10.2013.

7. Т е з и с ы выступления министра иностранных дел Республики Беларусь М. М. Хвостова на Междунар. конф. «Белорусский инвестиционный форум» «Состояние и перспективные направления внешнеэкономических связей Республики Беларусь» [Электронный ресурс] // Министерство иностранных дел Респ. Беларусь. – Режим доступа: [http://mfa.gov.by/print/press/news\\_mfa/c51bef227efc2784.html](http://mfa.gov.by/print/press/news_mfa/c51bef227efc2784.html). – Дата доступа: 12.02.2015.

8. А л е к с а н д р Л у к а ш е н к о дал интервью журналу «Туркменистан» (Подробности) [Электронный ресурс] // Общенациональное телевидение. Государство. Новости. – Режим доступа: [http://ont.by/news/our\\_news/00122740](http://ont.by/news/our_news/00122740). – Дата доступа: 10.02.2015.

9. Г р и ш к е в и ч, А. Лукашенко: локомотивом белорусской экономики в ближайшие годы должны стать наукоемкие отрасли [Электронный ресурс] / А. Гришкевич // Новости Беларуси. БЕЛТА. – Режим доступа: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorussoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli\\_i\\_692448.html](http://www.belta.by/ru/all_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorussoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli_i_692448.html). – Дата доступа: 09.02.2015.

10. П о с е щ е н и е торгово-развлекательного центра «Экспобел» 17 марта 2015 г. [Электронный ресурс] // Президент Республики Беларусь. Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. – Режим доступа: [http://president.gov.by/ru/news\\_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/](http://president.gov.by/ru/news_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/). – Дата доступа: 18.03.2015.

11. Д о к л а д Президента Республики Беларусь Александра Лукашенко на четвертом Всебелорусском народном собрании [Электронный ресурс] // Новополоцк, официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.novopolotsk.by/content/view/3139/176/>. – Дата доступа: 15.02.2015.

12. «М о г о т е к с» планирует направить на модернизацию производства 4,5–5 млн евро [Электронный ресурс] // Развіцце прамысловасці. – Режим доступа: <http://www.skyscraper.city/showthread.php?t=1520139>. – Дата доступа: 13.02.2015.

13. В к а р е т е прошлого далеко не уедешь [Электронный ресурс] // СБ Беларусь сегодня. – Режим доступа: <http://www.sb.by/peredovitsa/article/v-karete-proshlogo-daleko-ne-uedesh-2.html>. – Дата доступа: 12.02.2015.

14. С т р а т е г и я развития легкой промышленности России на период до 2020 г. [Электронный ресурс] // Минпромторг России. – Режим доступа: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/3>. – Дата доступа: 15.10.2012.

15. Л ы к о в, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

16. С т е п а н о в, В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 100 с.

17. Ш а р г у т, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.

18. Б р о д я н с к и й, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

19. С а ж и н, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. – М.: Химия, 1992. – 208 с.

20. С а ж и н, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин; под ред. Б. С. Сажина. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2000. – 297 с.

21. Х и м и я и химическая технология [Электронный ресурс] // Справочник химика 21. – Режим доступа: <http://chem21.info/page/049043014037203196159079062249018161008032117027/>. – Дата доступа: 12.01.2015.

22. Р а в и ч, М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов / М. Б. Равич. – М.: Изд-во АН СССР, 1966. – 407 с.

23. Б р о д я н с к и й, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.

24. Ш е й х е т, Ф. И. Материаловедение химикатов, красителей и моющих средств / Ф. И. Шейхет. – М.: Легкая индустрия, 1969. – 324 с.

25. К и с е л е в а, Т. Ф. Технология сушки: учеб.-метод. комплекс / Т. Ф. Киселева. – Кемерово: Кемеровский технол. ин-т пищевой пром., 2007. – 117 с.

26. С а ж и н, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
27. Н и к и т и н а, Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л. М. Никитина. – М.: Энергия, 1968. – 499 с.
28. C h o u d h u r y, A. K. Roy. Textile Preparation and Dyeing / A. K. Roy Choudhury. – Enfield, NH [u.-a.]: Science Publishers, 2006. – 834 p.
29. L e w i s, D. M. The Coloration of Wool and Other Keratin Fibres / D. M. Lewis, J. A. Rippon. – Bradford: Wiley, 2013. – 439 p.
30. К у л е з н е в, В. Н. Химия и физика полимеров: учеб. для химико-технолог. специальности вузов / В. Н. Кулезнев, А. В. Шершнев. – М.: Высш. шк., 1988. – 312 с.
31. У с м о н к у л о в, А. К. Экспериментальные исследования теплоемкости хлопчатка-сырца и его компонентов / А. К. Усмонкулов, О. Н. Алимов, М. М. Очиллов; под ред. А. К. Усмонкулова // Молодой ученый. – 2013. – № 1. – С. 23–25.
32. D u f f, D. Giles's Laboratory Course in Dyeing / D. Duff, R. Sinclair. – 4<sup>th</sup> ed. – Bradford: Society of Dyers and Colourists, 1989. – 167 p.
33. A C o m p r e h e n s i v e List of Some Common Solids as Brick, Cement, Glass and Many More – and Their Specific Heats – Imperial and SI Units [Electronic Resource] // The Engineering ToolBox. Mode of Access: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html). – Date of Access: 04.01.2006.
34. D i n c e r, I. Exergy, Second Edition: Energy, Environment and Sustainable Development / I. Dincer, M. A. Rosen / 2nd. ed. – Elsevier Science, 2012. – 576 p.
35. П л о т н о с т ь, теплопроводность, теплоемкость строительных, теплоизоляционных и других материалов // Thermalinfo.ru – Теплопроводность, теплоемкость, плотность, вязкость, температуропроводность и другие свойства веществ в таблицах [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: [http://thermalinfo.ru/publ/tverdye\\_veshhestva/stroitelnye\\_materialy/plotnost\\_teploprovodnost\\_teploemkost\\_stroitelnyh\\_materialov/6-1-0-2](http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/stroitelnye_materialy/plotnost_teploprovodnost_teploemkost_stroitelnyh_materialov/6-1-0-2). – Дата доступа: 12.08.2012.
36. С п р а в о ч н и к химика / Б. П. Никольский [и др.]; под общ. ред. Б. П. Никольского // База данных: свойства веществ: термодинамика: теплоемкости веществ [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: [http://www.chemway.ru/bd\\_chem/tbl\\_term\\_cp/w\\_tbl\\_term\\_cp\\_3.php](http://www.chemway.ru/bd_chem/tbl_term_cp/w_tbl_term_cp_3.php). – Дата доступа: 16.07.2014.
37. П е т у х о в, Б. В. Полиэфирные волокна / Б. В. Петухов. – М.: Химия, 1976. – 272 с.
38. В о р о н ц о в, И. И. Производство органических красителей / И. И. Воронцов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 554 с.
39. М е л ь н и к о в, Б. Н. Применение красителей: учеб. для вузов / Б. Н. Мельников, Г. И. Виноградова. – М.: Химия, 1986. – 240 с.
40. S c h o n b e r g e r, H. Best Available Techniques in Textile Industry [Electronic Resource] / H. Schonberger, T. Schafer // Berlin: Federal Environmental Agency Umweltbundesamt). – Mode of Access: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/best-available-techniques-in-textile-industry>. – Date of Access: 05.06.2014.
41. Р о м а н ю к, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / В. Н. Романюк. – Минск: БНТУ, 2010. – 365 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и ГТ

Поступила 20.03.2015

## REFERENCES

1. S a v k o, S. (2015) The Government Approves the National Strategy of the Socioeconomic Development of Belarus till 2030. *News of Belarus. BELTA*. Available at: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Belarusi-do-2030-goda\\_i\\_694751.html](http://www.belta.by/ru/all_news/society/Pravitelstvo-odobrilo-Natsionalnuju-strategiju-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Belarusi-do-2030-goda_i_694751.html). (Accessed 11 February 2015) (in Russian).
2. W h a t Will Belarus be Like in 2030? *News of Belarus. BELTA*. 2015. – Available at: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu\\_i\\_687128.html](http://www.belta.by/ru/all_news/economics/Kakoj-budet-Belarus-v-2030-godu_i_687128.html). (Accessed 11 February 2015) (in Russian).
3. P r o r o k o v, N. (2014) “Growth Limits”: the World Approaches the Collapse. *Theory&Practice*. Available at: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta>. (Accessed 11 September 2014) (in Russian).
4. M e d o u z, Donella, Randers, Y., & Medouz, Dennis (2007) *Growth Limits. 30 Years Later*. Moscow, Academkniga Publ. 342 p. (in Russian).

5. On the Results of Socioeconomic Development of the Industry in 2012 and the Objectives Assigned Before the Concern Bellegprom for 2013. *Bellegprom*. Available at: <http://www.bellegprom.by/print/press/news/ed8bd62b6fbba0c.html> (Accessed 1 October 2014) (in Russian).
6. The Complex Program of Development for the Light Industry of the Republic of Belarus in 2011–2015 with a Perspective to 2020. *Bellegprom*. Available at: <http://www.bellegprom.by/programs> (Accessed 2 October 2013) (in Russian).
7. The Theses of the Speech of Mr. Khvostov M. M., the Minister of Foreign Affairs of the Republic of Belarus at the International Conference “Belorussian Investment Forum” “The State and Perspective Directions of the External Economic Relations of the Republic of Belarus.” *The Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Belarus*. Available at: [http://mfa.gov.by/print/press/news\\_mfa/c51bef227efc2784.html](http://mfa.gov.by/print/press/news_mfa/c51bef227efc2784.html) (Accessed 12 February 2015) (in Russian).
8. Alexander Lukashenko Gives an Interview for the “Turkmenistan” Magazine (Details). *Nationwide Television. The State. News*. Available at: [http://ont.by/news/our\\_news/00122740](http://ont.by/news/our_news/00122740) (Accessed 10 February 2015) (in Russian).
9. Grishkevich, A. (2015) Lukashenko: the Knowledge-Intensive Industries are to Become the Locomotive for the Belorussian Economy in the Next Few Years. *Belarus News. BELTA*. Available at: [http://www.belta.by/ru/all\\_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorusskoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli\\_i\\_692448.html](http://www.belta.by/ru/all_news/president/Lukashenko-lokomotivom-belorusskoj-ekonomiki-v-blizhajshie-gody-dolzny-stat-naukoemkie-otrasli_i_692448.html) (Accessed 9 February 2015) (in Russian).
10. Visiting the Trade and Recreation Center “Ekspobel” on March 17<sup>th</sup> 2015. *The President of the Republic of Belarus. The Official Internet-Portal of the President of the Republic of Belarus*. Available at: [http://president.gov.by/ru/news\\_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/](http://president.gov.by/ru/news_ru/view/poseschenie-torgovo-razvlekatelnogo-tsentra-ekspobel-11019/) (Accessed 18 March 2015) (in Russian).
11. The Report of the President of the Republic of Belarus at the Fourth All-Belorussian Popular Assembly. *Novopolotsk Official Site*. Available at: <http://www.novopolotsk.by/content/view/3139/176/> (Accessed 15 February 2015) (in Russian).
12. “Mogotex” is Planning to Direct 4,5–5 Mio EUR for Production Modernization. *Industry Development*. Available at: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1520139> (Accessed 13 February 2015) (in Russian).
13. The Yesterday Carriage Will Not Drive Too Far. *SB. Belarus Today*. Available at: <http://www.sb.by/peredovitsa/article/v-karete-proshlogo-daleko-ne-uedesh-2.html> (Accessed 12 February 2015) (in Russian).
14. The Development. Strategy of the Light Industry of Russia for the Period Till 2020. *Minpromtorg of Russia*. Available at: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/3> (Accessed 15 October 2012) (in Russian).
15. Lykov, A. V. (1968) *The Theory of Drying*. Moscow, Energia. 472 p. (in Russian).
16. Stepanov, V. S. (1985) *Chemical Energy and Exergy of the Substances*. Novosibirsk, Nauka Publ. 100 p. (in Russian).
17. Shargut, Ya., & Petela, R. (1968) *Exsergy*. Moscow, Energia. 280 p. (in Russian).
18. Brodyan'skiy, V. M. (1973) *Exergy Method of the Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia. 296 p. (in Russian).
19. Sazhin, B. S., & Bulekov, A. P. (1992) *Exergy Method in Chemical Technology*. Moscow, Chemistry. 208 p. (in Russian).
20. Sazhin, B. S., Bulekov, A. P., & Sazhin, V. B. (2000) *Exergy Analysis of the Production Units Operation*. Moscow: Bauman MSTU Publ. 297 p. (in Russian).
21. Chemistry and Chemical Technology. *Chemist Reference Book 21*. Available at: <http://chem21.info/page/049043014037203196159079062249018161008032117027/> (Accessed 12 January 2015) (in Russian).
22. Ravich, M. B. (1966) *Simplified Technique of Thermotechnical Calculations*. Moscow, Publishing house of AS USSR. 407 p. (in Russian).
23. Brodyan'skiy, V. M., Fratsher, V., & Mikhalek, K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 p. (in Russian).
24. Shekhet, F. I. (1969) *Materials Chemistry of Chemicals, Coloring Agents, and Washing Materials*. Moscow, Legkaia Industriia Publ. 324 p. (in Russian).
25. Kiseleva, T. F. (2007) *Technology of Drying: Teaching Materials*. Kemerovo: Kemerovo Technology Institut of Food-Manufacturing Industry. 117 p. (in Russian).
26. Sazhin, B. S. (1984) *Principles of Drying Technology*. Moscow, Chemistry. 320 p. (in Russian).

27. Nikitina, L. M. (1968) *Thermodynamic Parameters and Mass-Transfer Coefficients in Wet Materials*. Moscow, Energia Publ. 499 p. (in Russian).
28. Choudhury, A. K. Roy. (2006) *Textile Preparation and Dyeing*. Enfield, Science Publishers. 834 p.
29. Lewis, D. M., & Rippon, J. A. (2013) *The Coloration of Wool and Other Keratin Fibres*. Bradford, Wiley. 439 p.
30. Kuliznev, V. N., & Shershnev, A. V. (1988) *Chemistry and Physics of Polymers*. Moscow, Vysshaya shkola. 312 p. (in Russian).
31. Usmonkulov, A. K., Alimov, O. N., & Ochilov, M. M. (2013) Experimental Studies of Raw-Cotton Heat Capacity and of its Components. *Molodoi Uchenyi* [Young Scientist], 1, 23–25 (in Russian).
32. Duff, D., & Sinclair, R. (1989) *Giles's Laboratory Course in Dyeing*. 4<sup>th</sup> ed. Bradford, Society of Dyers and Colourists. 167 p.
33. A Comprehensive List of Some Common Solids as Brick, Cement, Glass and Many More – and Their Specific Heats – Imperial and SI Units. *The Engineering ToolBox*. Available at: [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html) (Accessed 4 January 2006).
34. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2012) *Exergy, Second Edition: Energy, Environment and Sustainable Development*. 2nd. ed. Elsevier Science. 576 p.
35. Density, Thermal Conductivity, Heat Capacity of Building, Heat-Insulating and Other Materials. *Thermalinfo.ru – Thermal Conductivity, Heat Capacity, Density, Viscosity, Temperature Conductivity and Other Properties of Substances in Tables*. Available at: [http://thermalinfo.ru/publ/tverdye\\_veshhestva/stroitelnye\\_materialy/plotnost\\_teploprovodnost\\_teploemkost\\_stroitelnyh\\_materialov/6-1-0-2](http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/stroitelnye_materialy/plotnost_teploprovodnost_teploemkost_stroitelnyh_materialov/6-1-0-2) (Accessed 12 August 2012) (in Russian).
36. Chemist Reference Book / B. P. Nikol'skiy [et al.]; edited by B. P. Nikol'skiy // Data Base: Properties of the Substances: Thermodynamics: Heat Capacity of the Substances [Electronic Resource]. – 2014. – Access mode: [http://www.chemway.ru/bd\\_chem/tbl\\_term\\_cp/w\\_tbl\\_term\\_cp\\_3.php](http://www.chemway.ru/bd_chem/tbl_term_cp/w_tbl_term_cp_3.php). – Access Date: 16.07.2014 (in Russian).
37. Petukhov, B. V. (1976) *Polyester Fibre*. Moscow, Chemistry. 272 p. (in Russian).
38. Vorontsov, I. I. (1962) *Production of Organic Colorants*. Moscow, Goskhimizdat Publ. 554 p. (in Russian).
39. Melnikov, B. N., & Vinogradova, G. I. (1986) *The Use of Colorants*. Moscow, Chemistry. 240 p. (in Russian)
40. Schonberger, H., & Schafer, T. (2003) Best Available Techniques in Textile Industry. Berlin: Federal Environmental Agency (*Umweltbundesamt*). Available at: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/best-available-techniques-in-textile-industry> (Accessed 5 June 2014).
41. Romanuk, V. N. (2010) *Intensivnoe Energoberezhenie v Teplotekhnologicheskikh Sistemakh Promyshlennogo Proizvodstva Stroitel'nykh Materialov*. Diss. Dokt. Tekhn. Nauk [Intensive Energy Saving in Heat-Technological Systems of Industrial Production of the Building Materials. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk, BNTU. 365 p. (in Russian).