



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СВОБОДНОЙ И СВЯЗАННОЙ ВЛАГИ В ПИВНОЙ ДРОБИНЕ

Александра С. Данильченко¹, Хазрет Р. Сиюхов²,
Татьяна Г. Короткова¹, Белла Б. Сиюхова²

¹ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»;
ул. Московская, д. 2, г. Краснодар, 350072, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»;
ул. Первомайская, д.191, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация

Аннотация. Приведены экспериментальные данные по кинетике сушки сырой пивной дробины Майкопского пивзавода для двух температурных режимов 60°C и 55°C. Содержание сухого вещества 12,7%. Скорость сушильного агента составляла 4,5 м/с.

Цель – определение содержания свободной и связанной влаги в пивной дробине, полученной в качестве отхода при производстве пива по классической технологии.

Анализ кривых сушки и кривых скорости сушки показал, что свободная влага удаляется при изменении влагосодержания от начального 687,4% до 360%, при дальнейшем уменьшении влагосодержания удаляется связанная влага. Значение влагосодержания 360% принято находящимся на стыке между первым и вторым периодами сушки. В среднем содержание свободной влаги составляет 47%, связанной – 53%. Значительное количество связанной влаги свидетельствует о недостаточном разрушении клеточной структуры материала.

Ключевые слова: пивная дробина, кинетика сушки, скорость сушки, клеточная структура, влагосодержание, сухие вещества, свободная влага, отходы

Для цитирования: *Определение содержания свободной и связанной влаги в пивной дробине / Данильченко А.С. [и др.] // Новые технологии. 2020. Т. 15, № 4. С. 41–52. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-41-52>*

DETERMINATION OF THE CONTENT OF FREE AND ATTACHED MOISTURE IN SPENT GRAIN

Alexandra S. Danilchenko¹, Khazret R. Siyukhov²,
Tatiana G. Korotkova¹, Bella B. Siyukhova²

¹ FSBSI HE «Kuban State Technological University»;
2 Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, the Russian Federation

² FSBSI HE «Maykop State Technological University»;
191 Pervomayskaya str., Maykop, 385000, the Russian Federation

Annotation. Experimental data on the kinetics of drying of raw brewer's grains from the Maykop brewery for two temperature regimes of 60°C and 55°C are presented. The dry matter content is 12,7%. The drying agent speed is 4,5 m/s.

The purpose is to determine the content of free and attached moisture in brewer's grains obtained as a waste in the production of beer using classical technology.

Analysis of the drying curves and drying rate curves has shown that free moisture is removed when the moisture content changes from the initial 687,4% to 360%; with a further decrease in the moisture content, the attached moisture is removed. A moisture content of 360% is assumed to be at the interface between the first and second drying periods. The average free moisture content is 47%, that of the attached one is 53%. A significant amount of the attached moisture indicates insufficient destruction of the cellular structure of the material.

Keywords: brewer's grains, drying kinetics, drying rate, cell structure, moisture content, dry matter, free moisture, waste

For citation: *Determination of the content of free and attached moisture in spent grain / Danilchenko A.S. [et al.] // New technologies. 2020. Vol. 15, No. 4. P. 41–52. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-41-52>*

В технологии производства пива в заторном чане при смешивании дробленого солода с горячей водой образуется затор, из которого в процессе затирания извлекаются углеводы, белки, минеральные соли, дубильные, горькие и другие растворимые вещества. Полученный экстракт отделяют от затора методом фильтрации, а оставшийся влажный твердый осадок – пивная дробина – является отходом производства, который богат клетчаткой, белками, жирами и незаменимыми аминокислотами [1]. Содержание воды в пивной дробине составляет 75–85%, а сухой остаток содержит порядка 6,6% белковых веществ, 1,7% жира и 9,7% безазотистых экстрактивных веществ [2]. Предложено много путей утилизации пивной дробины: рекультивация нефтезагрязненной черноземной почвы [2–4], экспериментально апробированная в полевых условиях на черноземе в Самарской области [3]; использование в качестве ингредиента в исходном сырье для получения жидкофазных биологически активных средств для растениеводства и земледелия [5]; применение в качестве реагента для обработки буровых растворов [6]; в качестве сырья для получения ксилозы и ксилита [7] для производства молочной кислоты, активированного угля и фенольных кислот [8] при химико-термической обработке для получения топлива [9]. В обзоре [10] рассмотрено применение пивной дробины (brewer's spent grain (BSG)) в различных

производствах. Однако основным направлением является получение пищевой кормовой добавки, добавляемой в рацион сельскохозяйственных животных [11–13].

Разработана технология получения кормового концентрата на основе пивной дробины, прошедшей биологическую обработку путем биоферментации с помощью закваски Леснова, включающая стадии прессования для отделения жидкой фракции и смешения отпрессованной твердой фракции влажностью 50–60% с минеральными добавками и посевным материалом, приготовленным на основе отрубей и закваски Леснова. После биоферментации продолжительностью 6–8 ч при температуре 50–60°C полученный кормовой продукт влажностью 50–55% подвергают сушке в конверторной сушилке при 80°C до содержания влаги 12–14% с получением кормового концентрата [13].

Предложена технологическая схема производства биоразлагаемой упаковки из отходов пищевых производств пивоваренных, спиртовых, мясоперерабатывающих, маслоэкстракционных и сахарных заводов. Технология переработки отходов 4 класса опасности пивной дробины, свекловичного жома, спиртовой барды, масличного жома и костного клея включает следующие этапы: обезвоживание, измельчение, смешивание, разваривание, формирование, глазирование. Преимущество биоразлагаемой

Таблица 1

Результаты исследования кинетики сушки при температуре 60°C

Table 1

Results of the study of drying kinetics at a temperature of 60°C

| Процентное содержание сухого вещества 12,7 % | | | | | Эксперимент 1 | | | Эксперимент 2 | | |
|--|---------------------------------|-----------------|------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------|--|--------------------------------------|
| Масса чашки Петри, г | | | | | 121,292 | | | 120,527 | | |
| Масса навески, г | | | | | 50,563 | | | 50,568 | | |
| Масса сухого вещества, г | | | | | 6,642501 | | | 6,422136 | | |
| Время, мин | Эксперимент № 1 (чашка Петри 1) | | | | | Эксперимент № 2 (Чашка Петри 2) | | | | |
| | Масса навески, мг | Влажность, w, % | Влаго-содержание, u, % | Среднее значение двух измерений, \bar{u} , % | Скорость сушки, N, мин ⁻¹ | Масса навески, мг | Влажность, w, % | Влаго-содержание, u, % | Среднее значение двух измерений, \bar{u} , % | Скорость сушки, N, мин ⁻¹ |
| 0 | 50,563 | 87,300 | 687,402 | 687,402 | 0 | 50,568 | 87,300 | 687,402 | 687,402 | 0 |
| 5 | 49,711 | 87,082 | 674,134 | 680,768 | 2,654 | 50,023 | 87,162 | 678,915 | 683,158 | 1,697 |
| 10 | 48,598 | 86,786 | 656,801 | 665,467 | 3,466 | 49,063 | 86,910 | 663,967 | 671,441 | 2,990 |
| 15 | 47,459 | 86,469 | 639,064 | 647,933 | 3,547 | 47,967 | 86,611 | 646,901 | 655,434 | 3,413 |
| 20 | 46,320 | 86,137 | 621,327 | 630,195 | 3,547 | 46,844 | 86,290 | 629,415 | 638,158 | 3,497 |
| 25 | 45,146 | 85,776 | 603,044 | 612,186 | 3,656 | 45,734 | 85,958 | 612,131 | 620,773 | 3,457 |
| 30 | 43,988 | 85,402 | 585,011 | 594,028 | 3,607 | 44,591 | 85,598 | 594,333 | 603,232 | 3,560 |
| 35 | 42,854 | 85,015 | 567,352 | 576,181 | 3,532 | 43,435 | 85,214 | 576,333 | 585,333 | 3,600 |
| 40 | 41,708 | 84,604 | 549,505 | 558,429 | 3,569 | 42,276 | 84,809 | 558,286 | 567,309 | 3,609 |
| 45 | 40,607 | 84,186 | 532,360 | 540,933 | 3,429 | 41,107 | 84,377 | 540,083 | 549,184 | 3,641 |
| 50 | 39,477 | 83,734 | 514,763 | 523,561 | 3,519 | 39,966 | 83,931 | 522,316 | 531,200 | 3,553 |
| 55 | 38,359 | 83,259 | 497,353 | 506,058 | 3,482 | 38,867 | 83,477 | 505,204 | 513,760 | 3,423 |
| 60 | 37,238 | 82,756 | 479,896 | 488,624 | 3,491 | 37,729 | 82,978 | 487,484 | 496,344 | 3,544 |
| 65 | 36,112 | 82,218 | 462,361 | 471,128 | 3,507 | 36,612 | 82,459 | 470,091 | 478,787 | 3,479 |
| 70 | 34,955 | 81,629 | 444,343 | 453,352 | 3,604 | 35,507 | 81,913 | 452,885 | 461,488 | 3,441 |
| 75 | 33,835 | 81,021 | 426,902 | 435,622 | 3,488 | 34,403 | 81,333 | 435,694 | 444,289 | 3,438 |
| 80 | 32,729 | 80,380 | 409,678 | 418,290 | 3,445 | 33,279 | 80,702 | 418,192 | 426,943 | 3,500 |
| 85 | 31,617 | 79,690 | 392,362 | 401,020 | 3,463 | 32,171 | 80,037 | 400,939 | 409,566 | 3,451 |
| 90 | 30,518 | 78,958 | 375,247 | 383,804 | 3,423 | 31,094 | 79,346 | 384,169 | 392,554 | 3,354 |
| 95 | 29,405 | 78,162 | 357,915 | 366,581 | 3,466 | 29,999 | 78,592 | 367,119 | 375,644 | 3,410 |
| 100 | 28,321 | 77,326 | 341,034 | 349,474 | 3,376 | 28,949 | 77,816 | 350,769 | 358,944 | 3,270 |
| 105 | 27,270 | 76,452 | 324,667 | 332,851 | 3,273 | 27,914 | 76,993 | 334,653 | 342,711 | 3,223 |
| 110 | 26,251 | 75,538 | 308,799 | 316,733 | 3,174 | 26,880 | 76,108 | 318,552 | 326,603 | 3,220 |
| 115 | 25,259 | 74,577 | 293,350 | 301,074 | 3,090 | 25,879 | 75,184 | 302,966 | 310,759 | 3,117 |
| 120 | 24,290 | 73,563 | 278,260 | 285,805 | 3,018 | 24,907 | 74,216 | 287,830 | 295,398 | 3,027 |
| 125 | 23,345 | 72,493 | 263,544 | 270,902 | 2,943 | 23,924 | 73,156 | 272,524 | 280,177 | 3,061 |
| 130 | 22,407 | 71,342 | 248,937 | 256,241 | 2,921 | 22,970 | 72,041 | 257,669 | 265,097 | 2,971 |
| 135 | 21,493 | 70,123 | 234,704 | 241,820 | 2,847 | 22,045 | 70,868 | 243,266 | 250,468 | 2,881 |
| 140 | 20,622 | 68,861 | 221,140 | 227,922 | 2,713 | 21,142 | 69,624 | 229,205 | 236,235 | 2,812 |
| 145 | 19,758 | 67,499 | 207,685 | 214,412 | 2,691 | 20,264 | 68,308 | 215,534 | 222,369 | 2,734 |
| 150 | 18,954 | 66,121 | 195,165 | 201,425 | 2,504 | 19,416 | 66,923 | 202,329 | 208,931 | 2,641 |
| 155 | 18,170 | 64,659 | 182,956 | 189,060 | 2,442 | 18,609 | 65,489 | 189,763 | 196,046 | 2,513 |
| 160 | 17,402 | 63,099 | 170,996 | 176,976 | 2,392 | 17,807 | 63,935 | 177,275 | 183,519 | 2,498 |
| 165 | 16,657 | 61,449 | 159,394 | 165,195 | 2,320 | 17,036 | 62,303 | 165,270 | 171,273 | 2,401 |
| 170 | 15,918 | 59,659 | 147,886 | 153,640 | 2,302 | 16,302 | 60,605 | 153,841 | 159,555 | 2,286 |
| 175 | 15,205 | 57,767 | 136,783 | 142,334 | 2,221 | 15,599 | 58,830 | 142,894 | 148,368 | 2,189 |
| 180 | 14,549 | 55,863 | 126,567 | 131,675 | 2,043 | 14,929 | 56,982 | 132,462 | 137,678 | 2,087 |
| 185 | 13,921 | 53,872 | 116,787 | 121,677 | 1,956 | 14,291 | 55,062 | 122,527 | 127,494 | 1,987 |
| 190 | 13,300 | 51,718 | 107,117 | 111,952 | 1,934 | 13,686 | 53,075 | 113,107 | 117,817 | 1,884 |
| 195 | 12,713 | 49,489 | 97,976 | 102,546 | 1,828 | 13,085 | 50,920 | 103,748 | 108,428 | 1,872 |
| 200 | 12,147 | 47,135 | 89,161 | 93,568 | 1,763 | 12,500 | 48,623 | 94,639 | 99,194 | 1,822 |
| 205 | 11,596 | 44,623 | 80,581 | 84,871 | 1,716 | 11,958 | 46,294 | 86,200 | 90,420 | 1,688 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 210 | 11,062 | 41,950 | 72,265 | 76,423 | 1,663 | 11,449 | 43,907 | 78,274 | 82,237 | 1,585 |
| 215 | 10,579 | 39,300 | 64,743 | 68,504 | 1,504 | 10,971 | 41,463 | 70,831 | 74,553 | 1,489 |
| 220 | 10,110 | 36,484 | 57,440 | 61,092 | 1,461 | 10,489 | 38,773 | 63,326 | 67,078 | 1,501 |
| 225 | 9,680 | 33,662 | 50,744 | 54,092 | 1,339 | 10,043 | 36,054 | 56,381 | 59,853 | 1,389 |
| 230 | 9,266 | 30,698 | 44,296 | 47,520 | 1,289 | 9,628 | 33,297 | 49,919 | 53,150 | 1,292 |
| 235 | 8,889 | 27,759 | 38,426 | 41,361 | 1,174 | 9,259 | 30,639 | 44,173 | 47,046 | 1,149 |
| 240 | 8,561 | 24,991 | 33,318 | 35,872 | 1,022 | 8,908 | 27,906 | 38,708 | 41,440 | 1,093 |
| 245 | 8,262 | 22,277 | 28,662 | 30,990 | 0,931 | 8,589 | 25,228 | 33,741 | 36,224 | 0,993 |
| 250 | 8,008 | 19,811 | 24,706 | 26,684 | 0,791 | 8,340 | 22,996 | 29,863 | 31,802 | 0,775 |
| 255 | 7,794 | 17,610 | 21,373 | 23,040 | 0,667 | 8,132 | 21,026 | 26,625 | 28,244 | 0,648 |
| 260 | 7,636 | 15,905 | 18,913 | 20,143 | 0,492 | 7,959 | 19,310 | 23,931 | 25,278 | 0,539 |
| 265 | 7,516 | 14,562 | 17,044 | 17,979 | 0,374 | 7,810 | 17,770 | 21,611 | 22,771 | 0,464 |
| 270 | 7,444 | 13,736 | 15,923 | 16,484 | 0,224 | 7,683 | 16,411 | 19,633 | 20,622 | 0,396 |
| 275 | 7,409 | 13,328 | 15,378 | 15,651 | 0,109 | 7,583 | 15,309 | 18,076 | 18,855 | 0,311 |
| 280 | 7,392 | 13,129 | 15,113 | 15,246 | 0,053 | 7,499 | 14,360 | 16,768 | 17,422 | 0,262 |
| 285 | 7,378 | 12,964 | 14,895 | 15,004 | 0,044 | 7,438 | 13,658 | 15,818 | 16,293 | 0,190 |
| 290 | 7,364 | 12,799 | 14,677 | 14,786 | 0,044 | 7,427 | 13,530 | 15,647 | 15,733 | 0,034 |
| 295 | 7,347 | 12,597 | 14,413 | 14,545 | 0,053 | 7,406 | 13,285 | 15,320 | 15,483 | 0,065 |
| 300 | 7,334 | 12,442 | 14,210 | 14,311 | 0,040 | 7,399 | 13,203 | 15,211 | 15,265 | 0,022 |
| 305 | 7,320 | 12,275 | 13,992 | 14,101 | 0,044 | 7,393 | 13,132 | 15,117 | 15,164 | 0,019 |
| 310 | 7,314 | 12,203 | 13,899 | 13,945 | 0,019 | 7,388 | 13,073 | 15,040 | 15,079 | 0,016 |
| 315 | 7,305 | 12,094 | 13,758 | 13,829 | 0,028 | 7,383 | 13,015 | 14,962 | 15,001 | 0,016 |
| 320 | 7,301 | 12,046 | 13,696 | 13,727 | 0,012 | 7,380 | 12,979 | 14,915 | 14,938 | 0,009 |
| 325 | 7,293 | 11,950 | 13,572 | 13,634 | 0,025 | 7,377 | 12,944 | 14,868 | 14,892 | 0,009 |
| 330 | 7,286 | 11,865 | 13,463 | 13,517 | 0,022 | 7,374 | 12,908 | 14,822 | 14,845 | 0,009 |
| 335 | 7,284 | 11,841 | 13,431 | 13,447 | 0,006 | 7,370 | 12,861 | 14,759 | 14,790 | 0,012 |
| 340 | 7,284 | 11,841 | 13,431 | 13,431 | 0 | 7,370 | 12,861 | 14,759 | 14,759 | 0 |

упаковки состоит в низкой себестоимости и в полном разложении в природных условиях [14].

Способами переработки пивной дробины являются механическое обезвоживание и сушка нагретым воздухом. Подбор оборудования осуществляют на основе данных, полученных путем экспериментального исследования кинетики сушки.

В данной работе исследована кинетика сушки сырой пивной дробины для двух температурных режимов 60°C и 55°C. Образцы пивной дробины отобраны на Майкопском пивоваренном заводе, расположенном в г. Майкопе.

Исследование кинетики сушки проведено в сушильном шкафу Memmert UFE 400 класса Basic (Германия), оснащенный вентилятором AC axial fans Series 4000 N 119×119×38 фирмы EBM для создания принудительной циркуляции воздуха. Для каждого температурного режима шкаф предварительно прогревали до заданной температуры. На дисплее, расположенном

на панели управления, отображалась температура процесса. Скорость сушильного агента составляла 4,5 м/с, которая определена нами ранее в работе [15]. Для каждого температурного режима использовались две чашки Петри, в каждую из которых помещалась навеска сырой пивной дробины. Убыль массы навески фиксировали на весах Ohaus Discovery через 5 минут в течение всего эксперимента. Результаты экспериментальных данных приведены в таблицах 1 и 2. Содержание сухого вещества в % определено по ГОСТ 31640-2012 путем высушивания в стеклянных бюксах в сушильном шкафу в течение часа при температуре 105±2°C с последующим охлаждением в эксикаторе до комнатной температуры и взвешиванием. Содержание сухого вещества для сырой пивной дробины Майкопского пивзавода составило 12,7%.

По результатам экспериментальных данных построены кривые сушки (рисунок 1) и кривые скорости сушки (рисунок 2). Скорость сушки определена как

Таблица 2

Результаты исследования кинетики сушки при температуре 50°C

Table 2

Results of the study of drying kinetics at a temperature of 50°C

| Процентное содержание сухого вещества 12,7 % | | Эксперимент 1 | | | | Эксперимент 2 | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------|------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------|--|--------------------------------------|
| Масса чашки Петри, г | | 121,288 | | | | 120,518 | | | | |
| Масса навески, г | | 49,439 | | | | 49,147 | | | | |
| Масса сухого вещества, г | | 6,278753 | | | | 6,241669 | | | | |
| Время, мин | Эксперимент № 1 (чашка Петри 1) | | | | | Эксперимент № 2 (Чашка Петри 2) | | | | |
| | Масса навески, м г | Влажность, w, % | Влаго-содержание, u, % | Среднее значение двух измерений, \bar{u} , % | Скорость сушки, N, мин ⁻¹ | Масса навески, м г | Влажность, w, % | Влаго-содержание, u, % | Среднее значение двух измерений, \bar{u} , % | Скорость сушки, N, мин ⁻¹ |
| 0 | 49,439 | 87,300 | 687,402 | 687,402 | 0 | 49,147 | 87,300 | 687,402 | 687,402 | 0 |
| 5 | 49,124 | 87,219 | 682,385 | 684,893 | 1,978 | 48,579 | 87,152 | 678,301 | 682,852 | 1,820 |
| 10 | 48,362 | 87,017 | 670,248 | 676,317 | 2,817 | 47,715 | 86,919 | 664,459 | 671,380 | 2,768 |
| 15 | 47,425 | 86,761 | 655,325 | 662,787 | 3,072 | 46,792 | 86,661 | 649,671 | 657,065 | 2,958 |
| 20 | 46,446 | 86,482 | 639,733 | 647,529 | 3,090 | 45,838 | 86,383 | 634,387 | 642,029 | 3,057 |
| 25 | 45,487 | 86,197 | 624,459 | 632,096 | 2,940 | 44,892 | 86,096 | 619,231 | 626,809 | 3,031 |
| 30 | 44,529 | 85,900 | 609,201 | 616,830 | 3,082 | 43,924 | 85,790 | 603,722 | 611,476 | 3,102 |
| 35 | 43,559 | 85,586 | 593,752 | 601,477 | 3,016 | 42,994 | 85,482 | 588,822 | 596,272 | 2,980 |
| 40 | 42,594 | 85,259 | 578,383 | 586,068 | 3,053 | 42,029 | 85,149 | 573,362 | 581,092 | 3,092 |
| 45 | 41,630 | 84,918 | 563,030 | 570,706 | 3,009 | 41,095 | 84,812 | 558,398 | 565,880 | 2,993 |
| 50 | 40,687 | 84,568 | 548,011 | 555,520 | 2,920 | 40,139 | 84,450 | 543,081 | 550,739 | 3,063 |
| 55 | 39,756 | 84,207 | 533,183 | 540,597 | 2,939 | 39,173 | 84,066 | 527,605 | 535,343 | 3,095 |
| 60 | 38,799 | 83,817 | 517,941 | 525,562 | 3,075 | 38,221 | 83,670 | 512,352 | 519,978 | 3,050 |
| 65 | 37,820 | 83,398 | 502,349 | 510,145 | 3,081 | 37,283 | 83,259 | 497,324 | 504,838 | 3,006 |
| 70 | 36,838 | 82,956 | 486,709 | 494,529 | 3,094 | 36,323 | 82,816 | 481,944 | 489,634 | 3,076 |
| 75 | 35,861 | 82,491 | 471,148 | 478,929 | 3,053 | 35,376 | 82,356 | 466,771 | 474,358 | 3,034 |
| 80 | 34,900 | 82,009 | 455,843 | 463,496 | 2,986 | 34,428 | 81,870 | 451,583 | 459,177 | 3,038 |
| 85 | 33,947 | 81,504 | 440,665 | 448,254 | 3,012 | 33,490 | 81,363 | 436,555 | 444,069 | 3,006 |
| 90 | 32,979 | 80,961 | 425,248 | 432,956 | 3,071 | 32,558 | 80,829 | 421,623 | 429,089 | 2,986 |
| 95 | 32,018 | 80,390 | 409,942 | 417,595 | 2,971 | 31,605 | 80,251 | 406,355 | 413,989 | 3,054 |
| 100 | 31,070 | 79,792 | 394,843 | 402,393 | 2,996 | 30,681 | 79,656 | 391,551 | 398,953 | 2,961 |
| 105 | 30,125 | 79,158 | 379,793 | 387,318 | 2,946 | 29,744 | 79,015 | 376,539 | 384,045 | 3,002 |
| 110 | 29,199 | 78,497 | 365,045 | 372,419 | 2,877 | 28,822 | 78,344 | 361,768 | 369,153 | 2,954 |
| 115 | 28,290 | 77,806 | 350,567 | 357,806 | 2,835 | 27,923 | 77,647 | 347,364 | 354,566 | 2,881 |
| 120 | 27,409 | 77,092 | 336,536 | 343,551 | 2,709 | 27,025 | 76,904 | 332,977 | 340,171 | 2,877 |
| 125 | 26,455 | 76,266 | 321,342 | 328,939 | 2,660 | 26,157 | 76,138 | 319,071 | 326,024 | 2,781 |
| 130 | 25,713 | 75,581 | 309,524 | 315,433 | 2,632 | 25,312 | 75,341 | 305,533 | 312,302 | 2,708 |
| 135 | 24,898 | 74,782 | 296,544 | 303,034 | 2,493 | 24,489 | 74,512 | 292,347 | 298,940 | 2,637 |
| 140 | 24,107 | 73,955 | 283,946 | 290,245 | 2,484 | 23,694 | 73,657 | 279,610 | 285,978 | 2,547 |
| 145 | 23,319 | 73,075 | 271,395 | 277,671 | 2,468 | 22,906 | 72,751 | 266,985 | 273,298 | 2,525 |
| 150 | 22,547 | 72,153 | 259,100 | 265,248 | 2,390 | 22,151 | 71,822 | 254,889 | 260,937 | 2,419 |
| 155 | 21,799 | 71,197 | 247,187 | 253,143 | 2,314 | 21,423 | 70,865 | 243,226 | 249,057 | 2,333 |
| 160 | 21,073 | 70,205 | 235,624 | 241,405 | 2,253 | 20,726 | 69,885 | 232,059 | 237,642 | 2,233 |
| 165 | 20,371 | 69,178 | 224,443 | 230,034 | 2,158 | 20,032 | 68,842 | 220,940 | 226,499 | 2,224 |
| 170 | 19,695 | 68,120 | 213,677 | 219,060 | 2,096 | 19,352 | 67,747 | 210,045 | 215,493 | 2,179 |
| 175 | 19,034 | 67,013 | 203,149 | 208,413 | 2,056 | 18,691 | 66,606 | 199,455 | 204,750 | 2,118 |
| 180 | 18,386 | 65,850 | 192,829 | 197,989 | 2,024 | 18,067 | 65,453 | 189,458 | 194,456 | 1,999 |
| 185 | 17,754 | 64,635 | 182,763 | 187,796 | 1,948 | 17,450 | 64,231 | 179,573 | 184,515 | 1,977 |
| 190 | 17,144 | 63,376 | 173,048 | 177,906 | 1,890 | 16,855 | 62,968 | 170,040 | 174,806 | 1,907 |
| 195 | 16,554 | 62,071 | 163,651 | 168,349 | 1,820 | 16,260 | 61,613 | 160,507 | 165,274 | 1,907 |
| 200 | 15,986 | 60,723 | 154,605 | 159,128 | 1,750 | 15,684 | 60,204 | 151,279 | 155,893 | 1,846 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|---------|-------|--------|--------|---------|---------|-------|
| 205 | 15,444 | 59,345 | 145,972 | 150,289 | 1,659 | 15,141 | 58,776 | 142,579 | 146,929 | 1,740 |
| 210 | 14,931 | 57,948 | 137,802 | 141,887 | 1,569 | 14,606 | 57,266 | 134,008 | 138,294 | 1,714 |
| 215 | 14,443 | 56,527 | 130,030 | 133,916 | 1,497 | 14,081 | 55,673 | 125,597 | 129,802 | 1,682 |
| 220 | 13,975 | 55,072 | 122,576 | 126,303 | 1,444 | 13,591 | 54,075 | 117,746 | 121,671 | 1,570 |
| 225 | 13,525 | 53,577 | 115,409 | 118,993 | 1,390 | 13,116 | 52,412 | 110,136 | 113,941 | 1,522 |
| 230 | 13,087 | 52,023 | 108,433 | 111,921 | 1,362 | 12,658 | 50,690 | 102,798 | 106,467 | 1,468 |
| 235 | 12,671 | 50,448 | 101,808 | 105,120 | 1,256 | 12,227 | 48,952 | 95,893 | 99,346 | 1,381 |
| 240 | 12,278 | 48,862 | 95,548 | 98,678 | 1,211 | 11,812 | 47,158 | 89,244 | 92,569 | 1,330 |
| 245 | 11,897 | 47,224 | 89,480 | 92,514 | 1,185 | 11,402 | 45,258 | 82,675 | 85,960 | 1,314 |
| 250 | 11,528 | 45,535 | 83,603 | 86,542 | 1,139 | 11,018 | 43,350 | 76,523 | 79,599 | 1,230 |
| 255 | 11,180 | 43,839 | 78,061 | 80,832 | 1,047 | 10,639 | 41,332 | 70,451 | 73,487 | 1,214 |
| 260 | 10,849 | 42,126 | 72,789 | 75,425 | 1,038 | 10,287 | 39,325 | 64,812 | 67,631 | 1,128 |
| 265 | 10,542 | 40,441 | 67,900 | 70,344 | 0,887 | 9,964 | 37,358 | 59,637 | 62,224 | 1,035 |
| 270 | 10,263 | 38,821 | 63,456 | 65,678 | 0,871 | 9,656 | 35,360 | 54,702 | 57,170 | 0,987 |
| 275 | 9,989 | 37,143 | 59,092 | 61,274 | 0,852 | 9,349 | 33,237 | 49,784 | 52,243 | 0,984 |
| 280 | 9,730 | 35,470 | 54,967 | 57,030 | 0,773 | 9,080 | 31,259 | 45,474 | 47,629 | 0,862 |
| 285 | 9,489 | 33,831 | 51,129 | 53,048 | 0,748 | 8,819 | 29,225 | 41,292 | 43,383 | 0,836 |
| 290 | 9,255 | 32,158 | 47,402 | 49,265 | 0,724 | 8,596 | 27,389 | 37,720 | 39,506 | 0,715 |
| 295 | 9,030 | 30,468 | 43,818 | 45,610 | 0,689 | 8,396 | 25,659 | 34,515 | 36,117 | 0,641 |
| 300 | 8,821 | 28,820 | 40,490 | 42,154 | 0,626 | 8,204 | 23,919 | 31,439 | 32,977 | 0,615 |
| 305 | 8,627 | 27,220 | 37,400 | 38,945 | 0,591 | 8,045 | 22,416 | 28,892 | 30,166 | 0,509 |
| 310 | 8,446 | 25,660 | 34,517 | 35,959 | 0,547 | 7,907 | 21,061 | 26,681 | 27,786 | 0,442 |
| 315 | 8,281 | 24,179 | 31,889 | 33,203 | 0,490 | 7,790 | 19,876 | 24,806 | 25,744 | 0,375 |
| 320 | 8,130 | 22,771 | 29,484 | 30,687 | 0,462 | 7,691 | 18,845 | 23,220 | 24,013 | 0,317 |
| 325 | 7,991 | 21,427 | 27,270 | 28,377 | 0,412 | 7,604 | 17,916 | 21,826 | 22,523 | 0,279 |
| 330 | 7,866 | 20,179 | 25,280 | 26,275 | 0,371 | 7,534 | 17,153 | 20,705 | 21,266 | 0,224 |
| 335 | 7,747 | 18,952 | 23,384 | 24,332 | 0,318 | 7,475 | 16,499 | 19,760 | 20,232 | 0,189 |
| 340 | 7,632 | 17,731 | 21,553 | 22,469 | 0,280 | 7,425 | 15,937 | 18,959 | 19,359 | 0,160 |
| 345 | 7,528 | 16,595 | 19,896 | 20,725 | 0,248 | 7,382 | 15,447 | 18,270 | 18,614 | 0,138 |
| 350 | 7,470 | 15,947 | 18,973 | 19,435 | 0,179 | 7,357 | 15,160 | 17,869 | 18,069 | 0,080 |
| 355 | 7,427 | 15,460 | 18,288 | 18,630 | 0,151 | 7,335 | 14,906 | 17,517 | 17,693 | 0,070 |
| 360 | 7,366 | 14,760 | 17,316 | 17,802 | 0,110 | 7,322 | 14,755 | 17,308 | 17,413 | 0,042 |
| 365 | 7,332 | 14,365 | 16,775 | 17,046 | 0,104 | 7,291 | 14,392 | 16,812 | 17,060 | 0,099 |
| 370 | 7,306 | 14,060 | 16,361 | 16,568 | 0,060 | 7,267 | 14,109 | 16,427 | 16,619 | 0,077 |
| 375 | 7,268 | 13,611 | 15,755 | 16,058 | 0,053 | 7,232 | 13,694 | 15,866 | 16,147 | 0,112 |
| 380 | 7,223 | 13,073 | 15,039 | 15,397 | 0,042 | 7,200 | 13,310 | 15,354 | 15,610 | 0,103 |
| 385 | 7,203 | 12,831 | 14,720 | 14,879 | 0,034 | 7,197 | 13,274 | 15,306 | 15,330 | 0,010 |
| 390 | 7,184 | 12,601 | 14,418 | 14,569 | 0,022 | 7,182 | 13,093 | 15,065 | 15,186 | 0,048 |
| 395 | 7,176 | 12,503 | 14,290 | 14,354 | 0,007 | 7,175 | 13,008 | 14,953 | 15,009 | 0,022 |
| 400 | 7,176 | 12,503 | 14,290 | 14,290 | 0 | 7,175 | 13,008 | 14,953 | 14,953 | 0 |

отношение уменьшения влагосодержания материала к промежутку времени, за которое это уменьшение произошло. При построении кривой скорости сушки взято среднее значение двух рядом стоящих измерений влагосодержания.

Анализ рисунков 1 и 2 показывает наличие трех периодов сушки сырой пивной дробины, что соответствует общим представлениям о сушке влажных материалов. В периоде прогрева материала влагосодержание изменяется от 687,4% до 650%. В периоде постоянной скорости

сушки (первом периоде) влагосодержание изменяется от 650% до 360%, и происходит интенсивное удаление свободной влаги. Скорость сушки составляет 3 мин⁻¹ при температуре сушильного агента 55°C и возрастает до 3,5 мин⁻¹ при температуре сушильного агента 60°C. В периоде падающей скорости сушки (втором периоде) происходит удаление связанной влаги до достижения равновесного влагосодержания, которое в среднем находится в диапазоне 14,0–14,6%. Для сохранения питательных свойств пивной дробины и

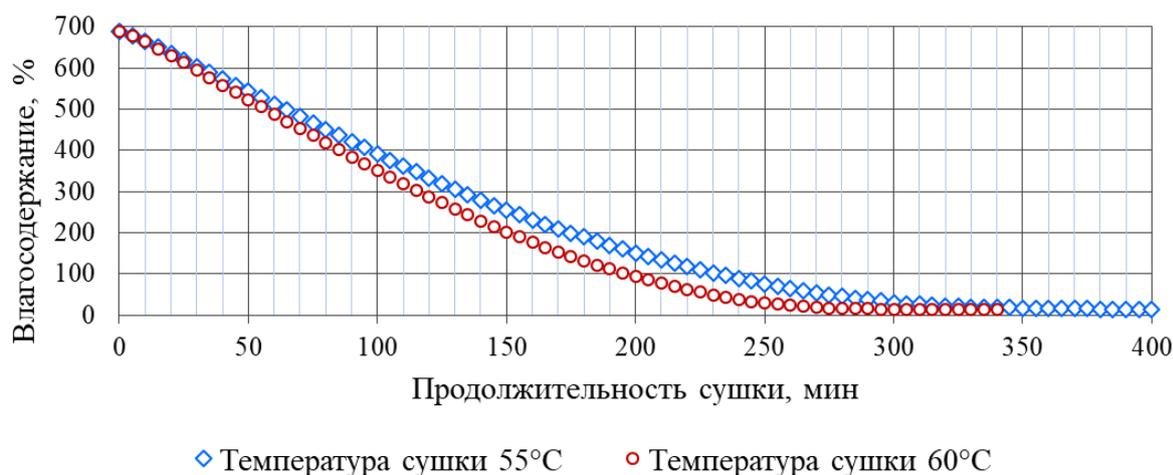


Рис. 1. Кривая сушки пивной дробины (эксперимент № 2)

Fig. 1. Drying curve of brewer's grains (experiment No. 2)

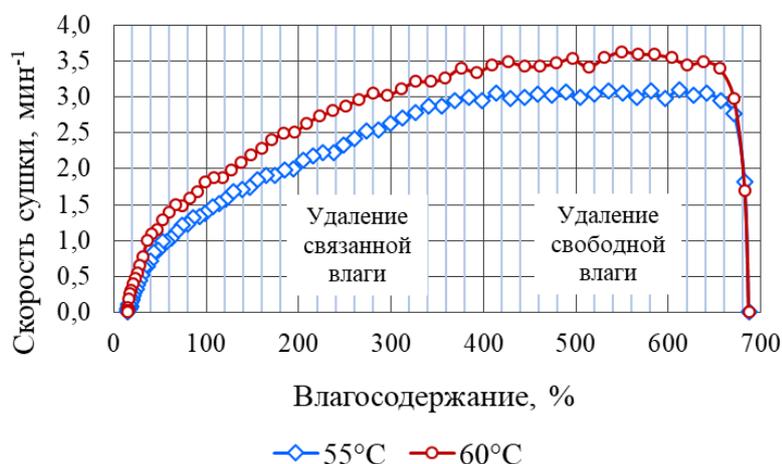


Рис. 2. Кривая скорости сушки пивной дробины (эксперимент № 2)

Fig. 2. Brewer's grain drying rate curve (experiment No. 2)

исключения денатурации белков температура сушки в производственных условиях не превышает 60°C.

Определим процентное содержание свободной и связанной влаги в пивной дробине. Согласно экспериментальным данным, приведенным на рисунке 2, примем, что влагосодержание 360% соответствует первому критическому влагосодержанию, находящемуся на стыке между периодом постоянной скорости сушки и периодом падающей скорости сушки. Это означает, что при этом значении влагосодержания заканчивается удаление свободной влаги и начинается удаление связанной влаги. Определим

процентное содержание свободной и связанной влаги в пивной дробине. Необходимые данные для расчета возьмем из таблиц 1 и 2. Массу влаги в навеске определим как разность между массой навески и массой сухого вещества. Исходные и расчетные значения приведены в таблице 3.

Примем, что содержание свободной влаги составляет 47%, связанной 53%. Данное соотношение свободной и связанной влаги в пивной дробине свидетельствует о превышении количества связанной влаги по сравнению со свободной. Таким образом, применяемое перед сушкой пивной дробины в производственных

Содержание свободной и связанной влаги в пивной дробине

Table 3

Free and attached moisture content in brewer's grains

| Температура сушильного агента, °С | Масса навески, г | Масса влаги в навеске, г | Масса навески, г, при влагосодержании ~360% | Масса испаренной влаги, г, а – с | Содержание свободной влаги, %, (d / b)·100 | Содержание связанной влаги, %, 100 – e |
|-----------------------------------|------------------|--------------------------|---|----------------------------------|--|--|
| | a | b | c | d | e | f |
| 60 | 50,563 | 43,920 | 29,405 | 21,158 | 48,174 | 51,826 |
| | 50,568 | 44,146 | 29,999 | 20,569 | 46,593 | 53,407 |
| 50 | 49,439 | 43,160 | 28,896 | 20,543 | 47,597 | 52,403 |
| | 49,147 | 42,905 | 28,822 | 20,325 | 47,372 | 52,628 |
| Среднее значение | | | | | 47,434 | 52,566 |

условиях её механическое обезвоживание (отжим, прессование) позволяет

максимально удалить свободную влагу, но не способствует разрушению

Сырая дробина



Сухая дробина

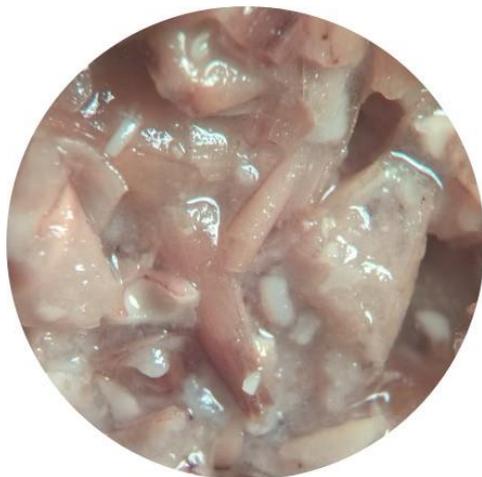


Внешний вид (без увеличения)



Увеличение 0,6x14 (8,4 крат)

Сырая дробина



Сухая дробина



Увеличение 1x14 (14 крат)

Сырая дробина



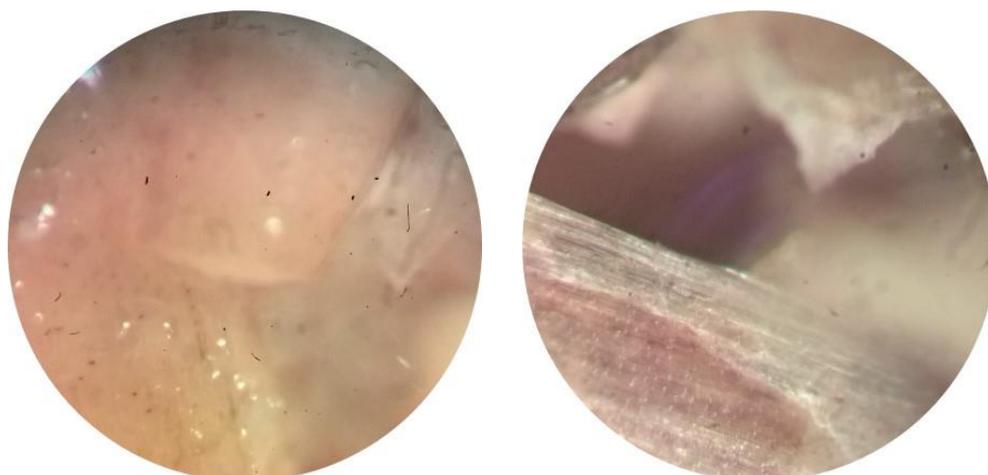
Сухая дробина



Увеличение 2x14 (28 крат)



Увеличение 4x14 (56 крат)



Увеличение 7x14 (98 крат)

Рис. 3. Пивная дробина Майкопского пивзавода до и после сушки при различных увеличениях под микроскопом

Fig. 3. Beer grain from Maykop brewery before and after drying at various magnifications under the microscope

клеточной структуры материала и снижению количества связанной влаги.

На рисунке 3 приведен внешний вид пивной дробины Майкопского пивзавода до и после сушки без увеличения и при различных увеличениях под микроскопом МБС-10.

Размеры крупных частиц пивной дробины составляют 5–7 мм, что соответствует стандартному размолу исходного сырья (солода) на дробилках. Содержание крупных частиц является преобладающим. Связанная влага удерживается адсорбционными силами (адсорбционно связанная влага) и содержится в клетках

материала (осмотически связанная влага). Наличие большого количества разрушенных клеток материала объясняет значительное количество связанной влаги в пивной дробине.

Сухая пивная дробина имеет более длительный срок хранения. Ее используют в качестве кормовой добавки в корм для сельскохозяйственных животных.

Вывод:

Содержание связанной влаги в пивной дробине больше, чем свободной, что свидетельствует о недостаточном разрушении клеточной структуры материала при дроблении.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кунце В. Технология солода и пива / пер. с нем. СПб.: Профессия, 2001. 911 с.
2. Руденко Е.Ю. Влияние отходов пивоварения на ферментативную активность нефтезагрязненной чернозёмной почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 60–64.
3. Руденко Е.Ю. К перспективам использования отходов пивоварения для рекультивации нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. 2012. № 2. С. 34–38.
4. Руденко Е.Ю., Бахарев В.В., Чалдаев П.А. Рекультивация нефтезагрязненной почвы с использованием отходов пивоварения // Биотехнология. 2013. № 3. С. 51–57.
5. Рабинович Г.Ю., Фомичева Н.В., Ковалев Н.Г. Исследование воздействия пивной дробины на формирование жидкофазных биологически активных средств для растениеводства и земледелия // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 5. С. 49–52.

6. Реагент для обработки буровых растворов: патент № 2087512 / Д.А. Галян [и др.]; заявл. 05.17.94, опубл. 08.20.97.
7. Ферментативный гидролиз пивной дробины / Фазлиев И.И. [и др.] // Экология и промышленность России. 2012. № 8. С. 20–22.
8. Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept / Mussatto S.I. [et al.] // The Brazilian case. *Bioresour. Technol.* 2013. No. 148. P. 302–310.
9. Analysis of Drying of Brewers' Spent Grain / Arranz J.I. [et al.] // *Proceedings*. 2018. 2, 1467; doi:10.3390/proceedings2231467.
10. Aliyu S., Bala M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications // *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10(3), pp. 324–331, 17 January, doi: 10.5897/AJBx10.006.
11. Киреева К.В., Владимиров Н.И. Эффективность использования гранулированной смеси на основе сухой пивной дробины в рационах лактирующих коров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 5 (175). С. 92–95.
12. Велямов М.Т. Кормовая добавка из отходов пивоваренных производств с пробиотиком для откорма бычков / Ж.С. Алимкулов [и др.] // Алматы технологиялық университетінің хабаршысы. 2019. № 4. С. 77–81.
13. Лазаревич А.Н. Кормовой концентрат для сельскохозяйственных животных на основе отходов пивоваренного производства // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9. С. 203–207.
14. Антипов С.Т., Шахов С.В., Жигулина М.О. Внедрение принципов устойчивого развития производства биоразлагаемой упаковки из вторичных материальных ресурсов пищевых производств // Вестник ВГУИТ. 2014. № 4. С. 53–57.
15. Данильченко А.С., Короткова Т.Г. Влияние поверхности массообмена системы «вода – воздух» на температуру мокрого термометра при вынужденной конвекции воздуха в замкнутом объеме [Электронный ресурс] // Научные труды КубГТУ. 2016. № 10. С. 1–11. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1147> (дата обращения: 20.05.2020).

REFERENCES:

1. Kuntze V. Malt and beer technology / transl. from German. SPb.: Professiya, 2001. 911 p.
2. Rudenko E.Yu. The influence of brewing waste on the enzymatic activity of petroleum-contaminated chernozem soil // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No 3. P. 60–64.
3. Rudenko E.Yu. On the prospects of using brewing waste for the reclamation of petroleum-contaminated soils // *Ecology and industry of Russia*. 2012. No 2. P. 34–38.
4. Rudenko E.Yu., Bakharev V.V., Chaldae P.A. Reclamation of petroleum-contaminated soil using brewing waste // *Biotechnology*. 2013. No 3. P. 51–57.
5. Rabinovich G.Yu., Fomicheva N.V., Kovalev N.G. Investigation of the effect of brewer grains on the formation of liquid-phase biologically active agents for plant growing and agriculture // *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2014. No 5. P. 49–52.
6. Reagent for drilling fluid treatment: patent No 2087512/ D.A. Galyan [et al.]; declared 05.17.94, published 08.20.97.
7. Enzymatic hydrolysis of brewer's spent grains / Fazliev I.I. [et al.] // *Ecology and industry of Russia*. 2012. No 8. P. 20–22.
8. Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept / Mussatto S.I. [et al.] // The Brazilian case. *Bioresour. Technol.* 2013. 148. P. 302–310.
9. Analysis of drying of brewers' spent grain / Arranz J.I. [et al.] // *Proceedings* 2018, 2, 1467; doi:10.3390/proceedings2231467.
10. Aliyu S., Bala M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications // *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10(3), pp. 324–331, 17 January, doi: 10.5897/AJBx10.006.
11. Kireeva K.V., Vladimirov N.I. Efficiency of using a granular mixture based on dry brewer's spent grains in the diets of lactating cows // *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2019. No 5 (175). P. 92–95.

12. Feed additive from brewing waste with probiotic for fattening bulls / M.T. Velyamov [et al.] // Bulletin of Almaty Technological University. 2019. No 4. P. 77–81.

13. Lazarevich A.N. Feed concentrate for farm animals based on brewing waste // Bulletin Krasnoyarsk State Agrarian University. 2015. No 9. P. 203–207.

14. Antipov S.T., Shakhov S.V., Zhigulina M.O. Introduction of the principles of sustainable development of the production of biodegradable packaging from secondary material resources of food production // Voronezh State University of Engineering Technologies Bulletin. 2014. № 4. P. 53–57.

15. Danilchenko A.S., Korotkova T.G. Influence of the surface of mass transfer of the «water – air» system on the temperature of a wet thermometer during forced convection of air in a closed volume [Electronic resource] // Scientific works of KubSTU. 2016. No 10. P. 1–11. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1147> (access date: 20.05.2020).

Информация об авторах / Information about the authors:

Александра Сергеевна Данильченко, соискатель кафедры безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»;

bagira.ask@rambler.ru

Хазрет Русланович Сиухов, заведующий кафедрой технологии, машин и оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»; доктор технических наук, доцент;

siukhov@mail.ru

Татьяна Германовна Короткова, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»; доктор технических наук, доцент;

korotkova1964@mail.ru

Белла Батмизовна Сиухова, старший преподаватель кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»;

siyuhowa@mail.ru

Alexandra S. Danilchenko, a post-graduate student of the Department of Life Safety, FSBEI HE «Kuban State Technological University»;

bagira.ask@rambler.ru

Khazret R. Siukhov, Head of the Department of Technology, Machines and Equipment for Food Production, FSBEI HE «Maykop State Technological University»; Doctor of Technical Sciences, an associate professor;

siukhov@mail.ru

Tatiana G. Korotkova, a professor of the Department of Life Safety, FSBEI HE «Maykop State Technological University»; Doctor of Technical Sciences, an associate professor;

korotkova1964@mail.ru

Bella B. Siyukhova, a senior lecturer of the Department of Technology, Machines and Equipment for Food Production, FSBEI HE «Maykop State Technological University»;

siyuhowa@mail.ru