

Ханжаров Н.С.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ВАКУУМНО-АТМОСФЕРНОЙ СУШКИ ЖИДКО-ВЯЗКИХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ВЕРБЛЮЖЬЕГО И КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА

УДК: 66.047.2:66.047.1

В статье описан процесс вакуумно-атмосферной сушки жидко-вязких термолабильных материалов. Приведены результаты исследований теплообмена и критерияльные уравнения вакуумной и атмосферной сушки.

In the article the process vacuum-atmospheric drying of liquid-viscous termolabel materials is described. The results of researches of heating and mass exchange and criteria equations of vacuum and atmospheric drying are given.

Согласно обзору научных исследований в области сушки жидко-вязких материалов, распылительную и сублимационную сушку можно отнести к наиболее распространенным методам обезвоживания таких продуктов.

При распылительной сушке продолжительность пребывания материала в камере составляет несколько секунд, что позволяет достичь высокой производительности сушилки при небольших энергозатратах. Однако для термолабильных материалов ее применение нежелательно из-за высокого температурного уровня теплоносителя, который при входе в сушилку составляет 100-170 °С, а на выходе – 50-80 °С. Кроме того, при распылительной сушке наблюдаются значительные потери высушиваемого продукта из-за его уноса с отработавшим теплоносителем.

С точки зрения максимального сохранения биохимического состава жидко-вязкого материала и связанных с ним его целебных свойств из этих двух способов сушки предпочтителен второй. Однако, наряду с высоким качеством, готовый продукт, высушенный методом вакуумно-сублимационной сушки, имеет высокую себестоимость, связанную с высокими энергозатратами процесса. Кроме того, при замораживании пищевого продукта необходимо учитывать тот факт, что при очень низкой температуре замораживания в продукте происходят необратимые изменения, влияющие на его качество [1].

Как известно, одним из основных преимуществ вакуумно-сублимационной сушки по сравнению с другими методами является низкая степень усадки высушиваемого материала, связанная с его пористой структурой, которая достигается за счет сублимации кристаллов льда. При обезвоживании жидко-вязких материалов, таких как молоко и молочные продукты, когда готовый продукт должен иметь порошкообразную структуру, этот аспект не играет существенной роли. Но с другой стороны, предварительное замораживание и сушка в глубоком вакууме препятствуют вскипанию и выбросу молока из емкости. В этом аспекте актуальным является обезвоживание молока и молочных продуктов способом вакуумной сушки без его замораживания при средних и низких степенях разрежения вакуумной камеры. Отсутствие подобной информации в научной литературе объясняется тем, что сушка незамороженного жидко-вязкого материала в вакууме чревата выбросами его из емкости, что может привести к потере продукта.

Для решения поставленной задачи ранее был изучен метод вакуумной сушки жидко-вязких материалов с разработкой оптимального режима обезвоживания, который обеспечивает достаточную интенсивность процесса при отсутствии выброса молока из емкости. По результатам экспериментальных исследований вакуумной сушки верблюжьего и кобыльего молока при степенях разрежения среды (4÷10) кПа и температурах нагрева среды (35÷45) °С обнаружено, что интервал давлений (6÷10) кПа и температур (40÷45)°С характеризуется не только отсутствием выброса молока из емкости, но и высокой интенсивностью процесса сушки [2].

Однако с целью дополнительного снижения энергозатрат процесса сушки в разреженной среде был разработан способ вакуумно-атмосферной сушки жидко-вязких материалов.

В более ранних работах [3, 4] был предложен метод вакуумно-атмосферной сушки термолабильных материалов, который состоит в совмещении процессов вакуумной и атмосферной сушки при умеренных температурных режимах. С учетом того, что процесс сушки протекает в неглубоком вакууме, а также для атмосферного досушивания используется бросовая теплота конденсации холодильного агента, циркулирующего в предназначенной для улавливания испаряющихся с поверхности материала паров влаги холодильной машине, была обоснована экономическая эффективность вакуумно-атмосферного обезвоживания. Режимы атмосферной сушки атмосферной сушки термолабильных материалов были выбраны следующие: температура нагрева воздуха (36÷40) °С; скорость движения воздуха (0,25÷0,4) м/с.

Известно, что сушка является процессом переноса теплоты и массы, поэтому его исследование основано на определении характера изменения коэффициентов тепло- и массоотдачи от режимов процесса. При этом следует учесть, что вакуумно-атмосферная сушка является комбинацией двух самостоятельных процессов – вакуумной и атмосферной сушки, поэтому для каждого процесса коэффициенты тепло- и массоотдачи должны быть определены отдельно.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных данных по вакуумно-атмосферной сушке жидко-вязких материалов на примере верблюжьего молока. На рисунках 1-4 приводятся экспериментальные

зависимости коэффициентов тепло- и массоотдачи от режимов вакуумной и атмосферной сушки верблюжьего молока.

Как видно из рисунков 1-4, с увеличением температуры и скорости сушки и понижением давления величины коэффициентов тепло- и массоотдачи, а, следовательно и интенсивность процесса возрастает. Из рисунков 1 и 2 можно заключить, что в интервале давлений (10-6) кПа и температур нагрева (35-45)⁰С коэффициент теплоотдачи возрастает на (27-29)%, а коэффициент массоотдачи – на (22-31)%, т.е. процесс испарения влаги для вакуумной сушки одинаково обусловлен процессами тепло- и массопереноса.

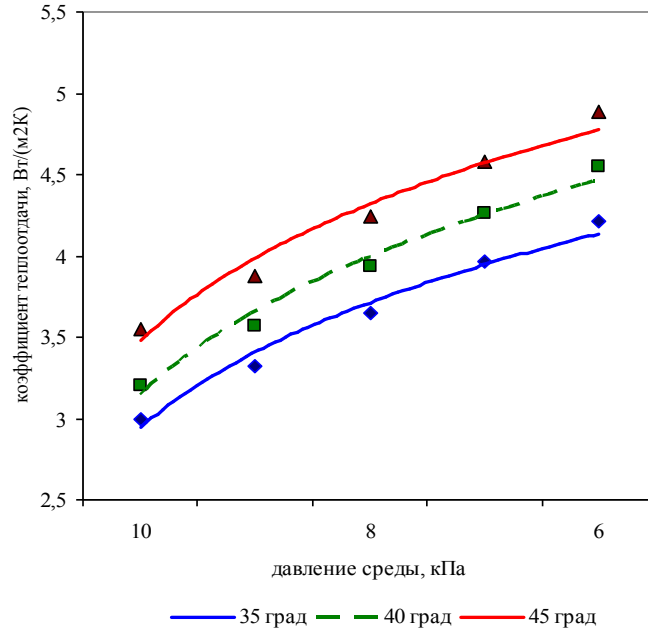


Рисунок 1. – Зависимость коэффициентов теплоотдачи от температуры и давления среды при вакуумной сушке верблюжьего молока.

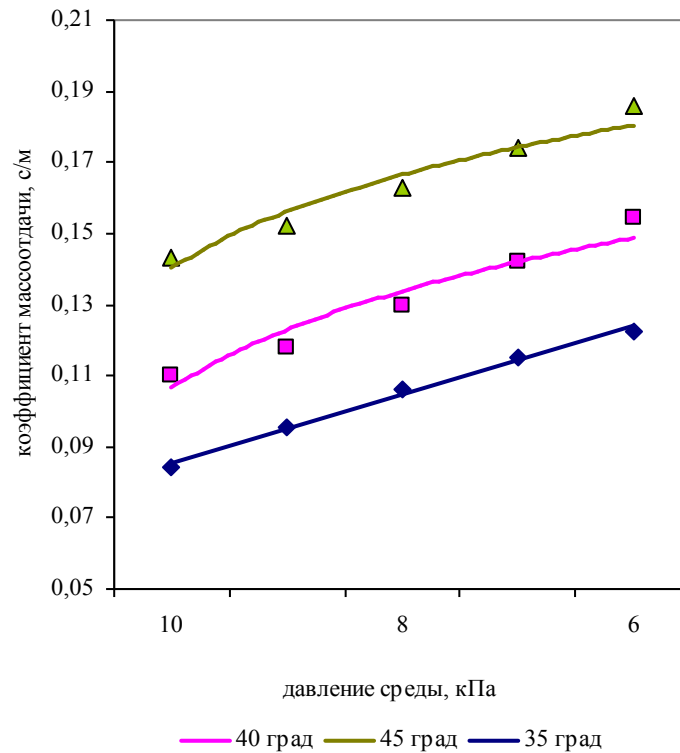


Рисунок 2. – Зависимость коэффициентов массоотдачи от температуры и давления среды при вакуумной сушке верблюжьего молока.

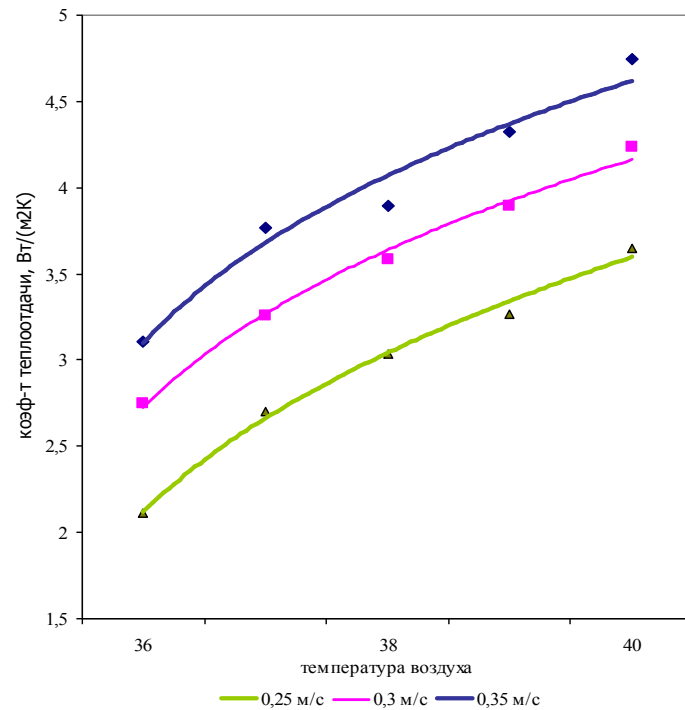


Рисунок 3. – Зависимость коэффициентов теплоотдачи от температуры и скорости воздуха при атмосферной сушке верблюжьего молока.

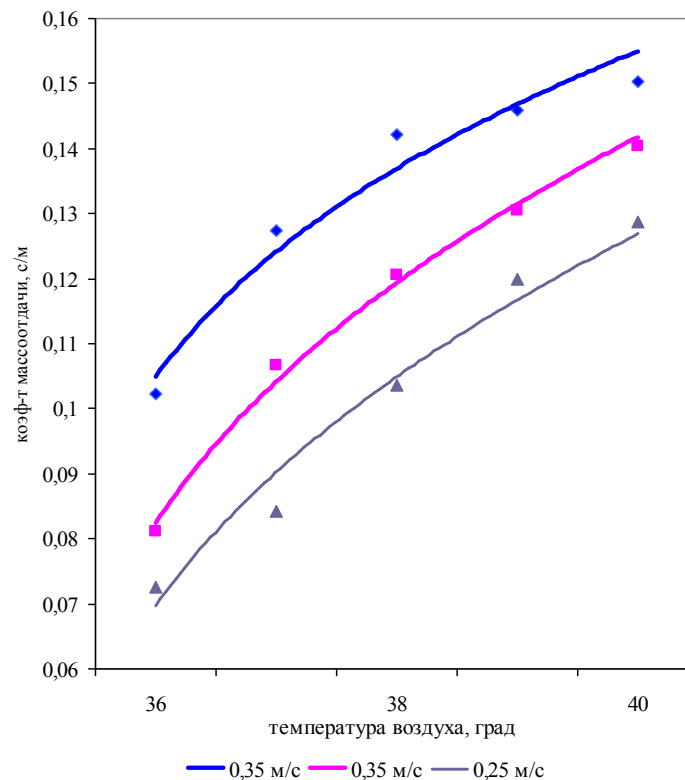


Рисунок 4. – Зависимость коэффициентов массоотдачи от температуры и скорости воздуха при атмосферной сушке верблюжьего молока.

Для атмосферной сушки (рисунки 3 и 4) можно заключить, что в интервале температур (36-38) °С и скоростей воздуха (0,25-0,35) м/с коэффициент теплоотдачи возрастает на (34-40)%, а коэффициент массоотдачи – на (27-41)%.

Логическим завершением изучения тепломассообменного процесса является составление его аналитического описания в критериальной форме, используя при этом полученные значения коэффициентов переноса теплоты и массы. Однако чтобы описать теплообменный процесс в критериальном виде, необходимо знать его состав, т.е. виды критериальных чисел, входящих в уравнение. Ранее доказано, что для вакуумной сушки при низкой степени разрежения среды состав критериальных уравнений совпадает с составом критериального уравнения при атмосферной сушке [5] и должен выглядеть следующим образом:

- теплообменный критерий Нуссельта

$$Nu = A Re^a Gu^b Pr^c, \quad (1)$$

- массообменный критерий Нуссельта

$$Nu_m = B Re^d Gu^e Pr^f, \quad (2)$$

где: Pr и Pr_m – теплообменный и массообменный критерии Прандтля; Re - критерий Рейнольдса; Gu – критерий Гухмана; A, B – постоянные, определяемые экспериментально; a, b, c, d, e, f – показатели степеней критериальных чисел, также определяемые опытным путем.

На основании проведенного анализа экспериментальных данных по тепло- и массообмену при вакуумно-атмосферной сушке жидко-вязких термолабильных материалов для процесса вакуумной сушки получены уравнения теплового Nu и диффузионного Nu_m критериев Нуссельта:

$$Nu = 5,25 Pr^{0,33} Re^{0,025} Gu^{0,47} \quad (3)$$

$$Nu_m = 0,056 Pr_m^{0,33} Re^{0,61} Gu^{0,16}. \quad (4)$$

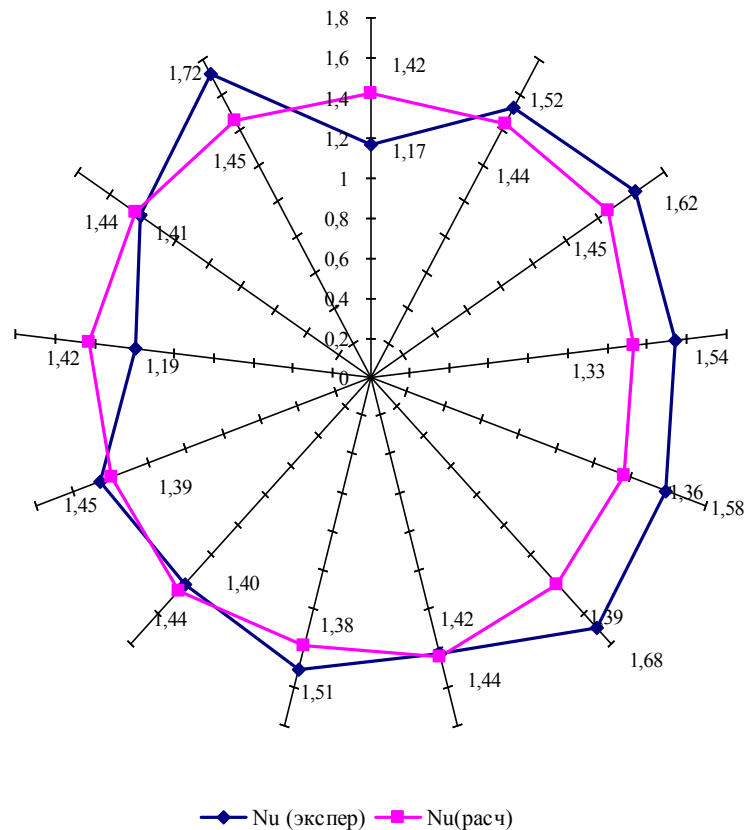
Также на основании экспериментальных данных исследования тепло- и массообмена при вакуумно-атмосферной сушке жидко-вязких термолабильных материалов получены уравнения теплового Nu и диффузионного Nu_m чисел Нуссельта для процесса атмосферной сушки:

$$Nu = 0,638 Pr^{0,33} Re^{0,16} Gu^{0,26} \quad (5)$$

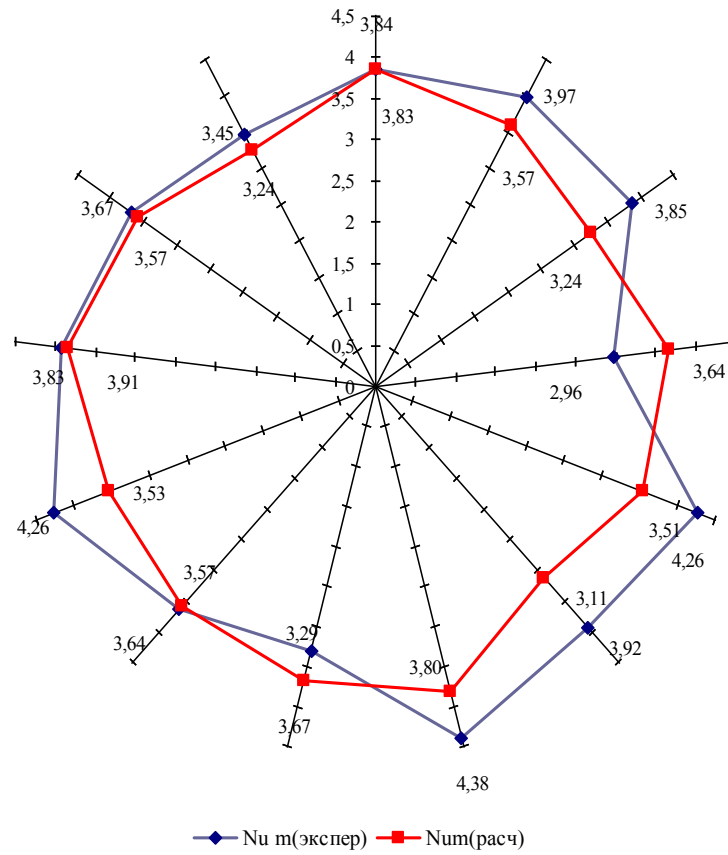
$$Nu_m = 0,71 Pr_m^{0,33} Re^{0,18} Gu^{0,14}. \quad (6)$$

Чтобы проверить достоверность уравнений (3-6) было произведено сравнение экспериментальных и расчетных значений критериев Нуссельта для вакуумной и атмосферной сушки (рисунки 5 и 6). Как видно из данных рисунков, расхождение для теплообменных критериев лежат в пределах (2-16)%, для массообменных (1,9-18)%. Полученные уравнения теплообменного и диффузионного критериев Нуссельта, как для вакуумной, так и атмосферной сушки верблюжьего и кобыльего молока просты и достаточно точно описывают процессы тепло- и массообмена.

С помощью критериальных уравнений теплового Nu и диффузионного Nu_m критериев Нуссельта (3-6) можно оценить интенсивность тепло- и массообмена при вакуумной сушке и атмосферной досушке жидко-вязких термолабильных материалов в вакуумно-атмосферной сушильной установке, кроме того, они могут быть использованы для проведения инженерных расчетов при проектировании новых аналогичных сушильных установок.

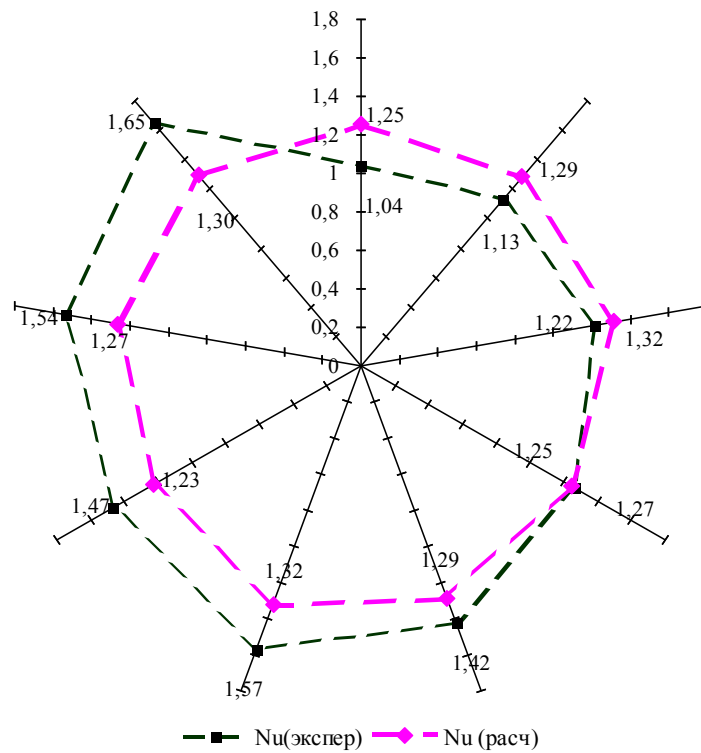


a)

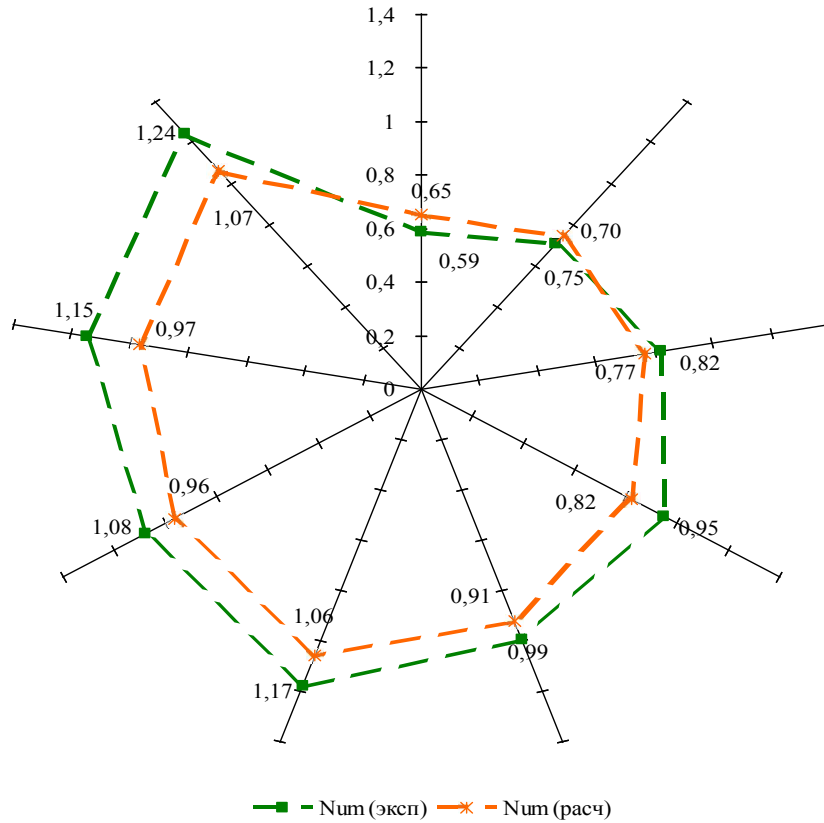


б)

Рисунок 5. – Сравнение значений экспериментального и расчетного критериев Нуссельта при вакуумной сушке: а) тепловой критерий Нуссельта; б) диффузионный критерий Нуссельта.



а)



б)

Рисунок 6 – Сравнение значений экспериментального и расчетного критериев Нуссельта при атмосферной сушке: а) тепловой критерий Нуссельта; б) диффузионный критерий Нуссельта.

Литература:

- 1 Алмаши А., Эрдели Л., Шарой Т. Быстрое замораживание пищевых продуктов. Пер. с венгер. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 408 с.
- 2 Ескендеров Ш.З., Ханжаров Н.С., Оспанов Б.О. Вакуумная сушка жидко-вязких термолабильных материалов // Тр. междунар. научно-практич. конф. «Процессы, машины и аппараты промышленных технологий» посвящ. 50-летию кафедры ТНГХК (МАХП). – Шымкент, 2006. – С. 125-127.
- 3 Ханжаров Н.С., Абдижаппарова Б.Т. Разработка процесса вакуумно-атмосферной сушки пищевых материалов // Материалы междунар. научно-практич. конф. «Стратегия развития пищевой и легкой промышленности». – Алматы: АТУ. - 2004, Т.1. - С.371-373.
- 4 Ханжаров Н.С., Абдижаппарова Б.Т., Оспанов Б.О. Исследование тепломассообмена при вакуумно-атмосферной сушке твердо-влажных и жидко-вязких материалов// Materials of final international scientifically-practical conference «The science: theory and practice. Vol. 28 Physics». – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o.; Prague, Czechia – Dnepropetrovsk, Ukraine – Belgorod, Russian, 2005. – P.54-57.
- 5 Ханжаров Н.С., Балабеков О.С., Алтухов А.В., Абдижаппарова Б.Т., Шертаев Т.У., Беяков В.В. О механизме внешнего тепломассообмена при сушке термолабильных материалов в разреженной среде // Тр. междунар. науч. конф. «Наука и образование на пороге XXI века», посвящ. 10-летию ЮКГИ им. М. Сапарбаева. – Шымкент: ЮКГИ им. М. Сапарбаева, 2004, Т. 2. - С. 94-98.