

УДК 66.047.2

Б. А. КАСЫМБЕКОВ, Н. С. ХАНЖАРОВ, М. С. САРЫПБЕКОВ, Б. О. ОСПАНОВ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ВАКУУМНО-АТМОСФЕРНОЙ СУШКИ ЖИДКО-ВЯЗКИХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К числу термолабильных материалов, требующих при сушке мягких температурных режимов, относится широкий спектр пищевых продуктов, химических и лекарственных веществ, медицинских препаратов и других материалов. Как правило, большая часть из них находится в жидком или жидко-вязком состоянии. Для удлинения сроков их хранения, а также удобства их транспортировки необходимо удалять из них большую часть влаги, т.е. подвергать концентрированию и сушке.

В данной работе в качестве контрольных объектов сушки приняты такие жидко-вязкие материалы, как кобылье и верблюжье молоко. Данные материалы являются прямыми эмульсиями, что определяет их кинетические особенности по сравнению с дисперсиями и кристаллизующими растворами. Кобылье и верблюжье молоко термолабильны. В связи с этим с ними процессы сушки производят в узком температурном интервале. Для получения продукции высокого качества процесс сушки необходимо проводить в вакууме [1]. Однако чисто вакуумная сушка имеет высокую себестоимость и поэтому не нашла широкого распространения в промышленности. В связи с этим разработан способ вакуумно-атмосферной сушки жидко-вязких материалов, который основан на совмещении вакуумной сушки с атмосферной. Разработка способа заключалась на подборе режимов вакуумной и атмосферной сушки с одинаковыми интенсивностями удаления влаги из материала. Кобылье и верблюжье молоко подвергалось вакуумной сушке при разрежении среды $P=(10\div 6)$ кПа и температурах нагрева среды $T = (35\div 45)$ °С. Атмосферная сушка протекала при температурах воздуха $T = (36\div 40)$ °С.

Экспериментально установлены следующие совмещаемые режимы вакуумной и атмосферной сушки:

– вакуумная сушка при давлении среды 6 кПа и температуре нагрева среды 40 °С с атмосферной сушкой при температуре воздуха 40 °С;

– вакуумная сушка при давлении среды 10 кПа и температуре нагрева среды 40 °С с атмосферной сушкой при температуре воздуха 36 °С;

– вакуумная сушка при давлении среды 8 кПа и температуре нагрева среды 45 °С с атмосферной сушкой при температуре воздуха 38 °С.

Для математического описания процесса вакуумно-атмосферной сушки были проведены экспериментальные исследования и с целью проверки адекватности модели эксперименту сравнивали теоретическую модель и экспериментальные данные при различных значениях параметров в заданных пределах изменения.

С этой целью математическим путем описаны кривые сушки, т.е. зависимость относительной влажности ω от продолжительности сушки τ при определенных значениях температуры нагрева и давления.

Для верблюжьего молока для вакуумной сушки при $T = 40$ °С, $P = 10$ кПа и для атмосферной сушки при $T = 36$ °С получено:

$$\omega = 88 - 14 \tau + 0,58 \tau^2.$$

Аналогично для кобыльего молока для вакуумной сушки при $T = 40$ °С, $P=10$ кПа и для атмосферной сушки при $T = 36$ °С получено:

$$\omega = 90 - 14,95 \tau + 0,65 \tau^2.$$

Для верблюжьего молока для вакуумной сушки при $T = 40$ °С, $P = 6$ кПа и для атмосферной сушки при $T = 40$ °С:

*Касымбеков Б.А., Ханжаров Н.С., Оспанов Б.О. Теплообмен при вакуумной сушке национальных молочных продуктов // Вестник НАН РК. 2005. №5. С. 11-14.

$$\omega = 88 - 23,94 \tau + 1,71 \tau^2.$$

Для кобыльего молока для вакуумной сушки при $T = 40^\circ\text{C}$, $P = 6$ кПа и для атмосферной сушки при $T = 40^\circ\text{C}$:

$$\omega = 90 - 26,39 \tau + 2,03 \tau^2.$$

Для верблюжьего молока для вакуумной сушки при $T = 45^\circ\text{C}$, $P = 8$ кПа и для атмосферной сушки при $T = 38^\circ\text{C}$:

$$\omega = 88 - 18,66 \tau + 1,04 \tau^2.$$

Для кобыльего молока для вакуумной сушки при $T = 45^\circ\text{C}$, $P = 8$ кПа и и для атмосферной сушки при $T = 38^\circ\text{C}$:

$$\omega = 90 - 21,44 \tau + 1,34 \tau^2.$$

Графическое изображение расчетных и экспериментальных кривых сушки для верблюжьего и кобыльего молока приведено на рис. 1–12. Анализ кривых, изображенных на рис. 1–12, показывает хорошую сходимость расчетных значений с экспериментальными. В то же время анализ кривых вакуумной сушки как верблюжьего, так и кобыльего молока при различных значениях температуры нагрева вакуумируемой среды и давлении в вакуумной камере показывает различную степень сходимости расчетных значений с экспериментальными. Особенно это относится к области периода падающей скорости сушки. Так для этого периода в кривых вакуумной сушки верблюжьего молока при давлении вакуумируемой среды 10 кПа и температуре нагрева среды 40°C максимальные расхождения расчетных и экспериментальных численных значений составляет 57 % – рис. 1. Те же значения при сушке кобыльего молока составляют около 50 % – рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых при вакуумной сушке этих материалов при давлении среды 6 кПа и той же температуре нагрева среды показывает, что максимальные расхождения составляют 23 и 47,4 % – рис. 3, 4. То есть можно сделать вывод о том, что разработанная модель более точно описывает процессы сушки при более низких давлениях вакуумируемой среды в вакуумной камере. С повышением температуры нагрева вакуумируемой среды до 45°C при давлении среды 8 кПа расхождений в расчетных и экспериментальных численных значениях относительной влажности высушиваемого материала в период падающей

скорости сушки практически не наблюдаются – рис. 3, 4. Однако на этих графиках наблюдаются незначительные расхождения в этих значениях в период постоянной скорости сушки для обоих исследуемых материалов. Как правило, эти расхождения не превышают 57 %. В связи с этим можно утверждать, что расчетные кривые сушек удовлетворительно совпадают с экспериментальными кривыми.

Рассчитанные зависимости относительной влажности от продолжительности сушки и скорости сушек верблюжьего и кобыльего молока при определенных значениях температуры нагрева и скорости сушильного агента в атмосферной досушке 0,4 м/с. представлены в виде графиков на рисунках 7–12. Необходимо отметить, что кривые сушек верблюжьего и кобыльего молока приведены только для тех температур нагрева сушильного агента в узле атмосферной досушки материалов, которые имеют хорошее совмещение с кривыми вакуумной сушки этих материалов. В связи с этим кривые вакуумной сушки приведены для температур 45 и 40°C , а при атмосферной досушке – для температур 40, 38 и 36°C . С этой же целью экспериментальные и расчетные кривые атмосферной досушки верблюжьего и кобыльего молока приведены только для скорости движения сушильного агента в узле атмосферной досушки 0,04 м/с. Также как при вакуумной сушке для проверки адекватности математической модели реальным процессам на рассчитанные зависимости относительной влажности верблюжьего и кобыльего молока графики наложены кривые сушек, полученные экспериментально. Анализ кривых сушек верблюжьего молока, изображенных на рис. 7, 9, 11, показывает хорошую сходимость расчетных значений с экспериментальными. Это относится к кривым атмосферной досушки верблюжьего молока на всем интервале температур воздуха – от 36 до 45°C . В то же время анализ кривых вакуумной сушки кобыльего молока при различных значениях температуры нагрева сушильного агента и скорости в устройстве атмосферной досушки, также как кривых сушек при вакуумной сушке, показывает различную степень сходимости расчетных значений с экспериментальными. Однако, в отличие от вакуумной сушки, в основном это относится к области периода постоянной скорости сушки. Так, для этого периода в

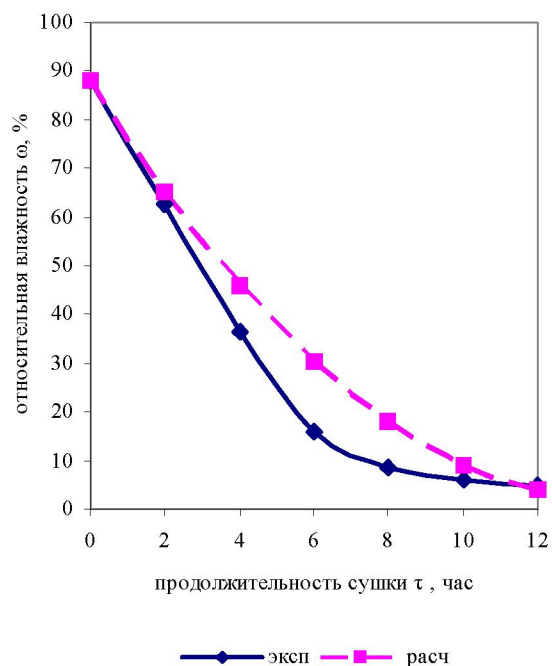


Рис. 1. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки верблюжьего молока при давлении среды 10 кПа и температуре нагрева среды 40 °С

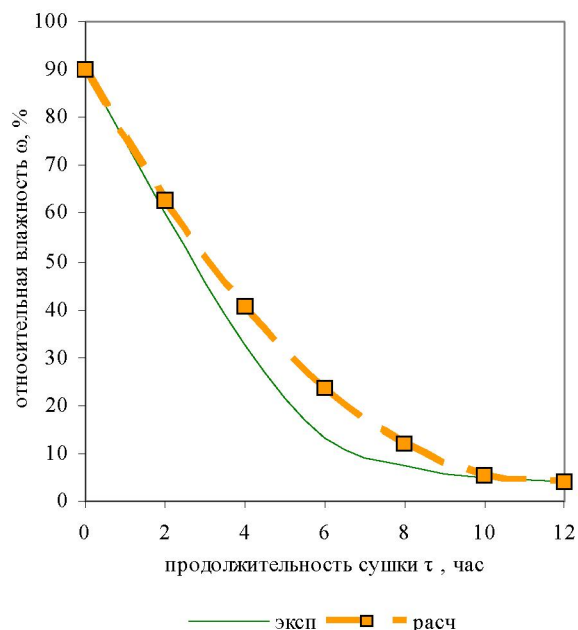


Рис. 2. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки козьего молока при давлении среды 10 кПа и температуре нагрева среды 40 °С

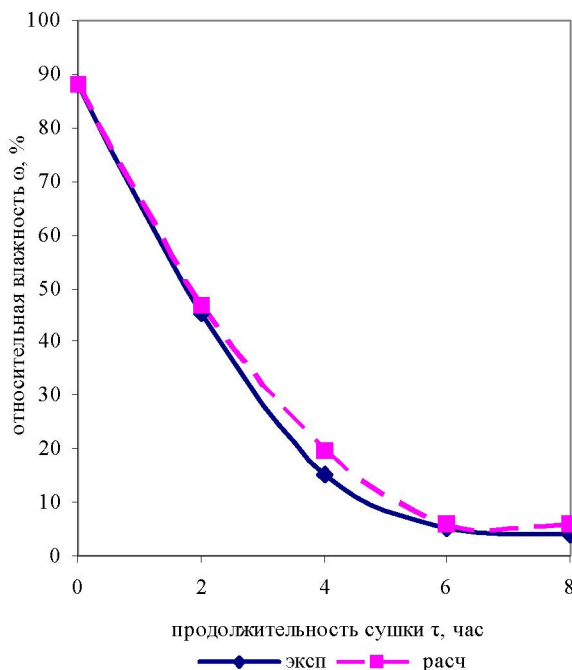


Рис. 3. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки верблюжьего молока при давлении среды 6 кПа и температуре нагрева среды 40 °С

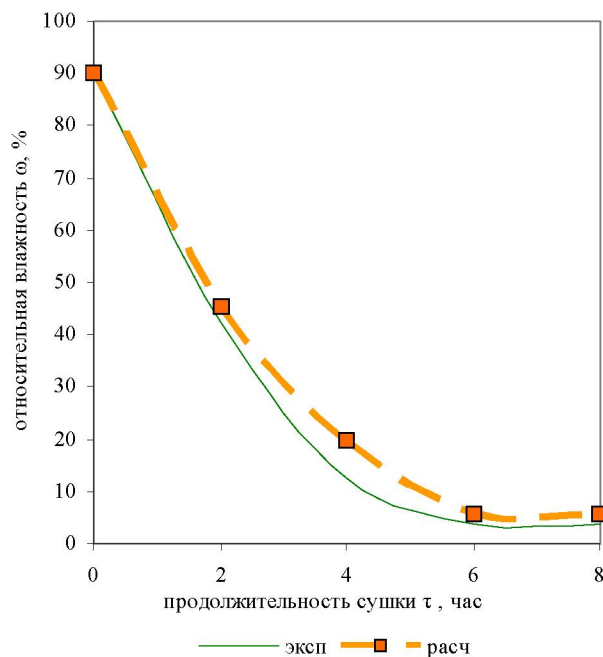


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки козьего молока при давлении среды 6 кПа и температуре нагрева среды 40 °С

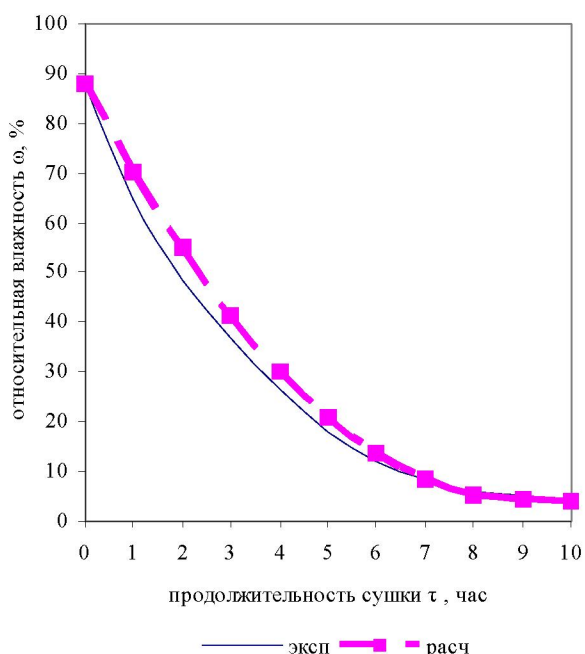


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки верблюжьего молока при давлении среды 8 кПа и температуре нагрева среды 45 °С

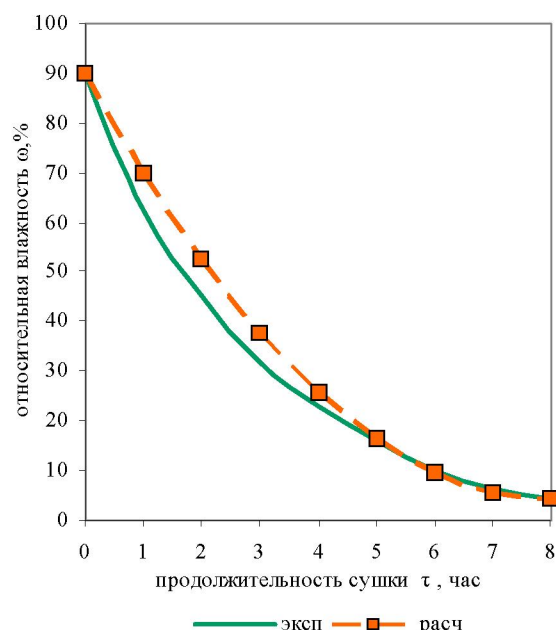


Рис. 6. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых вакуумной сушки козьего молока при давлении среды 8 кПа и температуре нагрева среды 45 °С

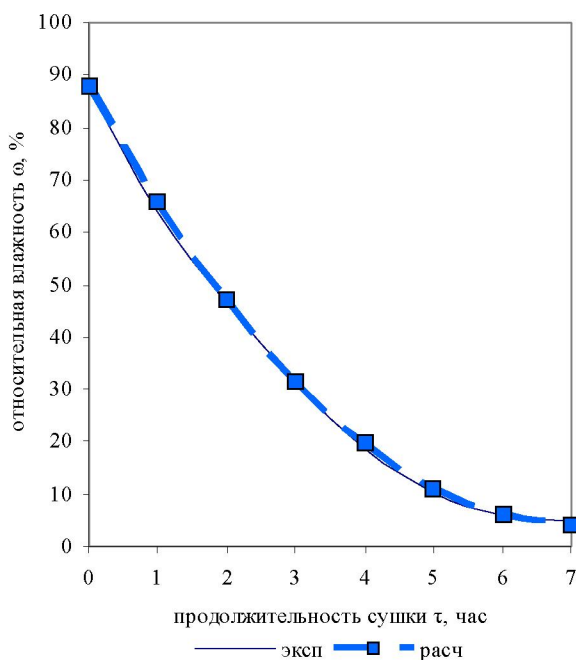


Рис. 7. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки верблюжьего молока температуре воздуха 40 °С

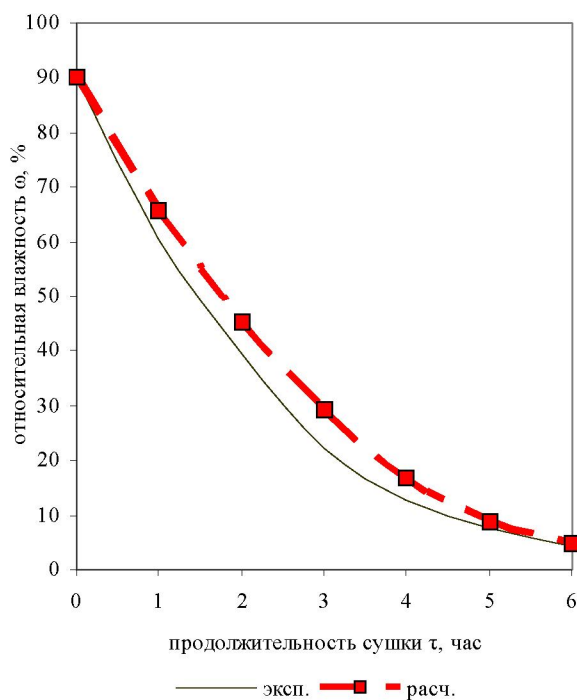


Рис. 8. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки козьего молока температуре воздуха 40 °С

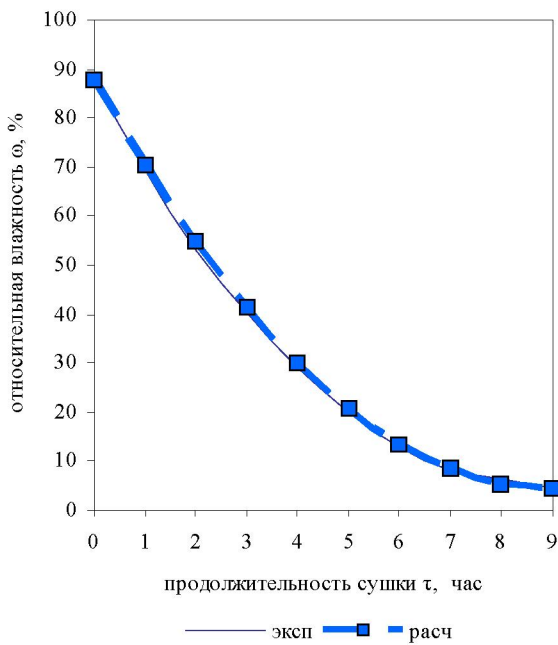


Рис. 9. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки верблюжьего молока температуре воздуха 38 °С

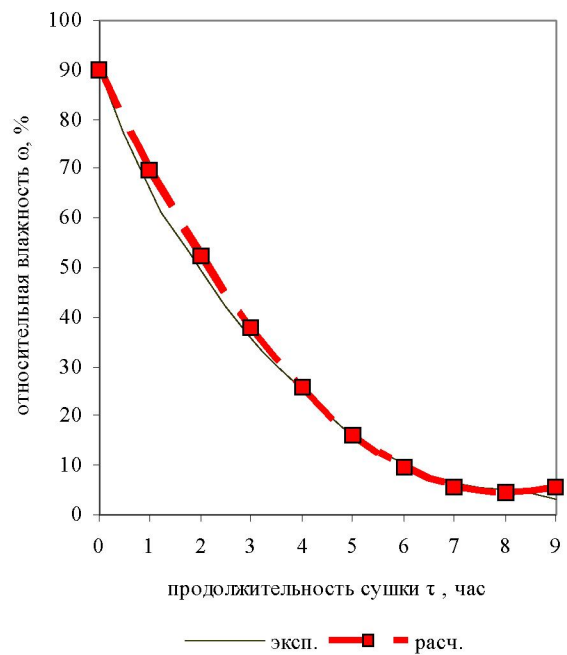


Рис. 10. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки козьего молока температуре воздуха 38 °С

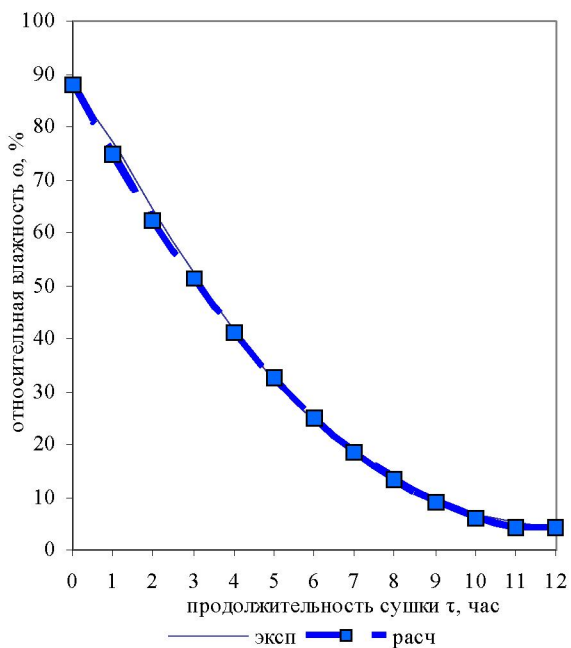


Рис. 11. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки верблюжьего молока температуре воздуха 36 °С

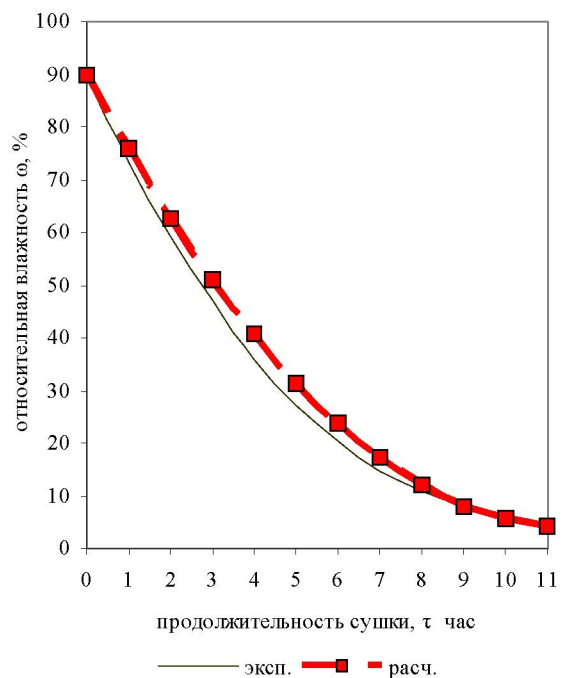


Рис. 12. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых атмосферной сушки козьего молока температуре воздуха 36 °С

кривых вакуумной сушки кобыльего молока при температуре нагрева среды 45 °С максимальные расхождения расчетных и экспериментальных численных значений составляет 9 % – рис. 5. Те же значения при температуре нагрева среды 40 °С составляют около 31 % – рис. 8.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых сушек при атмосферной досушке кобыльего молока при температуре нагрева воздуха до 36 °С показывает, что расхождения расчетных и экспериментальных значений составляют порядка 8 % – рис. 12. То есть можно сделать вывод о том, что разработанная модель более точно описывает процессы атмосферной досушки термолабильных жидко-вязких материалов на всем диапазоне исследуемых температур.

Таким образом, обобщая результаты анализа экспериментальных и теоретических данных, можно утверждать, что расчетные кривые сушек удовлетворительно совпадают с экспериментальными кривыми, как при вакуумной, так и при атмосферной сушке исследуемых материалов. Имеющиеся расхождения в основном относятся к узкому временному диапазону в различные пе-

риоды сушки. Поэтому применение разработанной математической модели для исследования процессов вакуумно-атмосферной сушки термолабильных жидко-вязких материалов представляется правомочным.

Полученные уравнения кривых сушки позволяют при наличии только одного параметра τ -продолжительности сушки достаточно четко точно определять относительную влажность высушиваемых термолабильных жидко-вязких материалов ω , которая является определяющим фактором для описания и анализа процесса сушки.

Резюме

Сұйық тұтқырлы материалдардың тәжірибелік зерттеулері нәтижесінде вакуум-атмосфералық кептіру процесінің математикалық суреттенуі жасалынды. Кептіру процесінің әртүрлі режимдері үшін алынған математикалық теңдеулер тәжірибе мен есептелген мәліметтерінің жақсы сәйкестігін көрсетті.

*ШФ КазАТК им. М. Тынышпаева, ЮКГУ
им. М. Ауезова, г. Шымкент;*

*Министерство охраны окружающей
среды РК, г. Астана*

Поступила 2.07.07г.