

УДК 66.047.2

М. С. САРЫПБЕКОВ, Б. А. КАСЫМБЕКОВ, Н. С. ХАНЖАРОВ, Б. Т. АБДИЖАППАРОВА

АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛООБМЕНА ВАКУУМНОЙ СУШКИ КРУПНОДИСПЕРСНЫХ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изучение процессов теплообмена является одним из приоритетных направлений теории сушки. Известно, что теплообмен может осуществляться тремя путями: конвекцией, теплопроводностью и радиацией. Большинство способов сушки являются комбинированными, т.е. включают два или три вышеперечисленных способа подвода теплоты. При этом доля каждого вида теплообмена может быть различной и колебаться в зависимости от типа и режима сушки, геометрических параметров обрабатываемого продукта и т.д. При атмосферной сушке передача теплоты происходит преимущественно за счет конвекции и кондукции, т.е. теплопроводности. При вакуум-сублимационной сушке, протекающей при глубоком вакууме, теплота преимущественно передается путем теплопроводности и излучения. Так, например, П. А. Новиковым при вакуум-сублимационной сушке нафталина установлено, что доля лучистого теплообмена лежит в пределах (30÷50) % от общего теплового потока [1]. Однако в научной литературе отсутствуют аналогичные сведения по вакуумной сушке термолабильных материалов, осуществляемых, как правило, при низких и средних степенях разрежения, а также при положительных температурах.

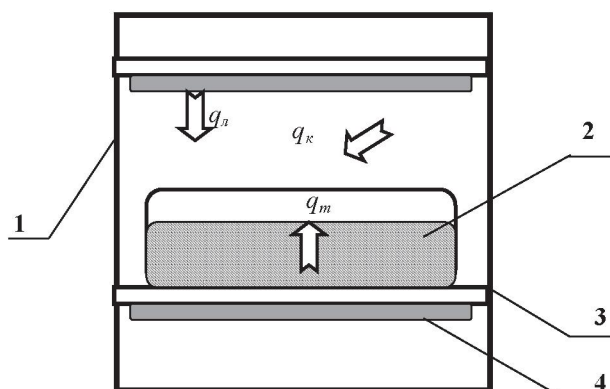


Рис. 1. Способы передачи теплоты в вакуумной сушильной камере (q_k – конвекция; q_n – лучеиспускание; q_m – теплопроводность); 1 – корпус вакуумной камеры; 2 – высушиваемый продукт; 3 – полка; 4 – электрические нагреватели

Ранее авторами статьи был предложен метод вакуумно-атмосферной сушки крупнодисперсных пищевых термолабильных материалов, основанный на совмещении процессов вакуумной и атмосферной сушки [2, 3]. В этом аспекте интерес представляет рассмотрение процесса вакуумной сушки, поскольку, когда касается пищевых продуктов, именно вакуумная сушка определяет качество получаемого продукта. Схема и способы передачи теплоты в вакуумной сушильной камере приведены на рис. 1. Известно, что в зависимости от степени вакуума меняется механизм процесса теплообмена [4-7]. В проведенных авторами экспериментальных исследованиях степень разрежения среды в вакуумной камере колебалась в пределах (8÷4) кПа. Данный уровень разрежения относится к области низкого и начала среднего вакуума [4]. Крупнодисперсный пищевой материал, в качестве которого выбраны измельченные в виде кубиков клубни топинамбура, располагался в виде плотного слоя на полках, которые обогревались смонтированными под ними электрическими нагревателями (рис. 1). Высота слоя высушиваемого материала колебалась от 0,01 до 0,04 м. Температура нагрева вакуумируемой среды изменялась в пределах (35÷55) °С.

Анализируя рис. 1, и учитывая, что сушка протекала при низком уровне вакуума, можно заключить, что при данном способе обезвоживания присутствуют все три способа передачи теплоты. Теплопроводность (q_m) происходит за счет передачи теплоты от полки, обогреваемой электрическими нагревателями, к материалу и передаваемой через весь его слой. Конвекция (q_k) осуществляется за счет прогрева остаточной воздушной среды камеры. Лучеиспускание (q_n) осуществляется электрическими нагревателями, расположенными попарно. При исследовании данного способа сушки необходимо определить долю каждого вида теплообмена и проанализировать изменение их величин в зависимости от давления среды, температуры нагрева среды и высоты слоя материала.

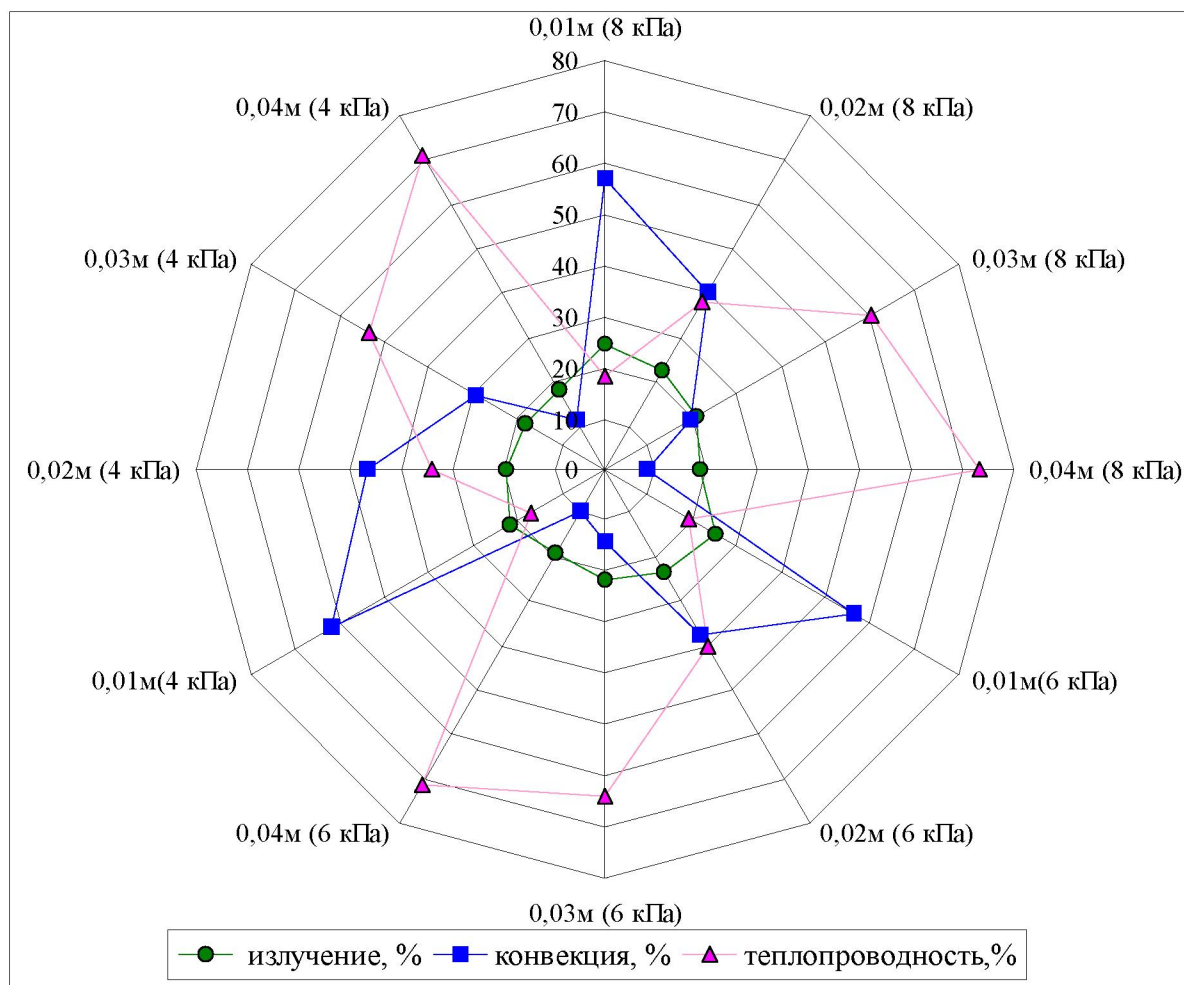


Рис. 2. Доля каждого вида теплообмена (%) при вакуумной сушке клубней топинамбура при температуре нагрева среды 35 °С

В соответствии с поставленной задачей по результатам экспериментальных исследований были определены численные значения составляющих теплообмена и определены их доли в суммарном потоке теплоты, затрачиваемом на осуществление процесса вакуумной сушки. Полученные результаты обработаны в виде лепестковых диаграмм, изображенных на рис. 2–4.

На рис. 2 показаны доли составляющих теплообмена в зависимости давления среды и высоты слоя материала при температуре нагрева среды 35 °С. Из рисунка видно, что только доля лучистой составляющей в зависимости от величины вакуума и высоты слоя материала меняется незначительно и колеблется в пределах (18÷25)%.

Значения конвективных потоков теплоты меняются намного больше. При давлении вакуумируемой среды 8 кПа с ростом высоты слоя с 0,01

до 0,04 м количество конвективных потоков теплоты уменьшается с 56,9 до 9,22%, при давлении среды 6 кПа – с 56,09 до 9,42%, а при 4 кПа – с 61,69 до 11,09%. Из этого следует, что в зависимости от степени разрежения вакуумируемой среды доля конвективного потока практически не меняется, но с ростом высоты слоя высушиваемого материала значительно уменьшается. Это объясняется тем, что с ростом высоты слоя возрастает доля кондуктивного теплообмена, т.е. теплопроводности, что является логичным. Так, с ростом высоты слоя с 0,01 до 0,04 м доля теплоты, подводимой теплопроводностью, возрастет при давлении среды 8 кПа с 18,38 до 73,23%, при 6 кПа – от 18,82 до 71,5%, при 4 кПа – от 16,56 до 70,95%, т.е. прямо пропорционально.

Аналогичный характер соотношения долевых значений составляющих теплообмена наблюдается

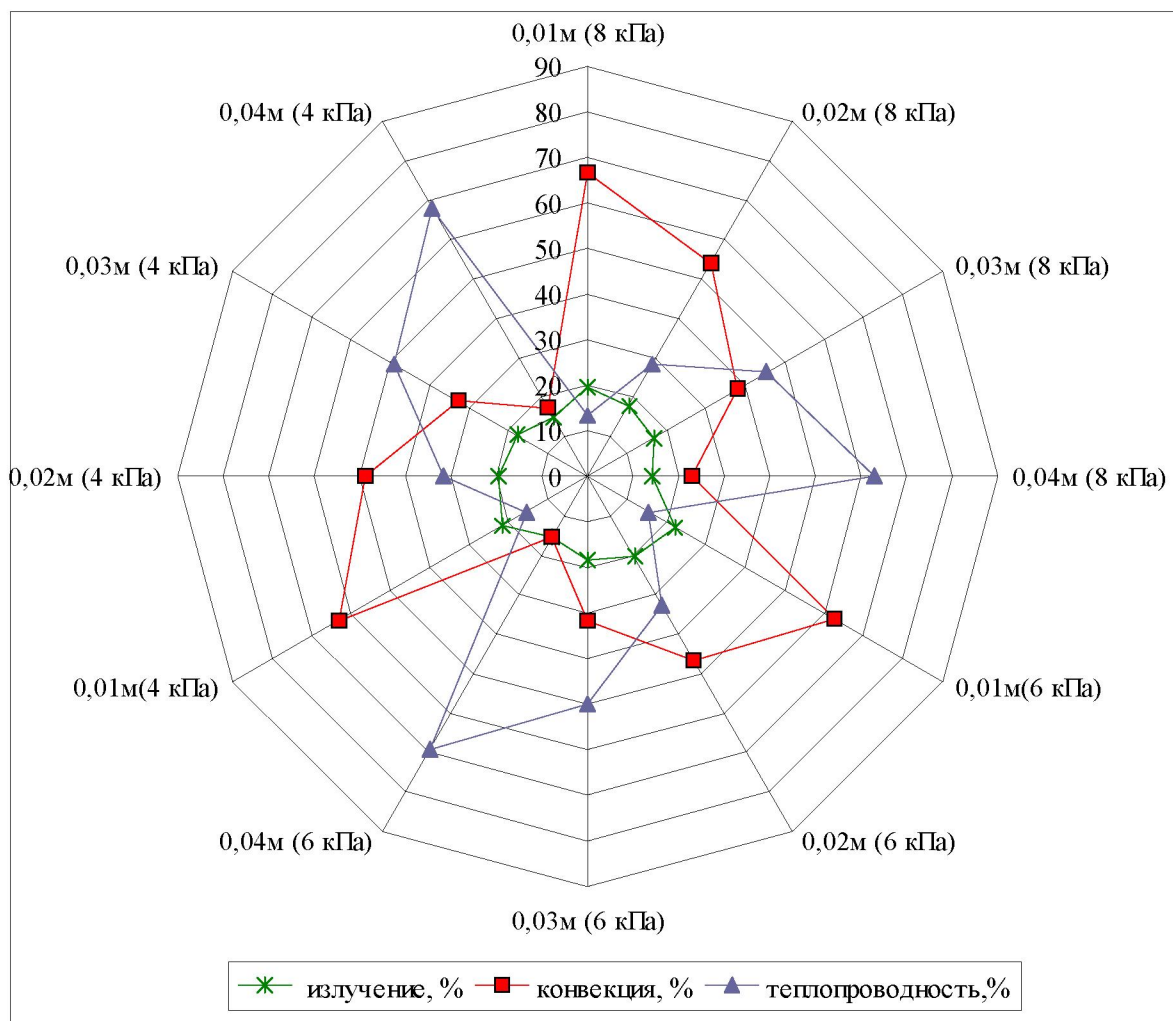


Рис. 3. Доля каждого вида теплообмена (%) при вакуумной сушке клубней топинамбура при температуре нагрева среды 45 °С

при температуре нагрева среды 45 °С (рис. 3). Значения лучистых составляющих с изменением степени разрежения меняются также незначительно, но имеют меньшие значения, чем при температуре нагрева среды 35 °С, и лежат в пределах (14,20÷22,22) %. Значения конвективных составляющих при давлении среды 8 кПа с ростом высоты слоя уменьшаются с 66,79 до 22,86 %, при 6 кПа – с 62,45 до 15,46 %, при 4 кПа – с 62,99 до 17,19 %. Эти значения незначительно превышают значения конвективных составляющих при температуре 35 °С. Доля потоков, подводимых теплопроводностью, при 8 кПа с ростом высоты слоя от 0,01 до 0,04 м возрастает прямо пропорционально – от 13,44 до 62,94 %, при 6 кПа – от 15,33 до 69,13%, при 4 кПа – от 15,21 до 67,86 %. В тоже время их численные значе-

ния несколько ниже, чем при предыдущем режиме нагрева.

При температуре нагрева среды 55 °С составляющие лучистых потоков лежат в пределах (10,05÷19,51) %, что значительно меньше, чем при температурах 35 и 45 °С (рис. 4). Значения конвективных составляющих больше, чем при других температурах, и при этом с ростом высоты слоя здесь не наблюдается значительной убыли их величин. Так, при давлении среды 8 кПа с увеличением высоты слоя от 0,01 до 0,04 м доля конвективного потока убывает от 68,62 до 33,42 %, при 6 кПа – от 74,18 до 45,44 % и при 4 кПа – от 76,02 до 49,49 %. Соответственно, доля кондуктивных потоков ниже, чем при предыдущих режимах, в тоже время их значения с ростом высоты слоя меняются также прямо

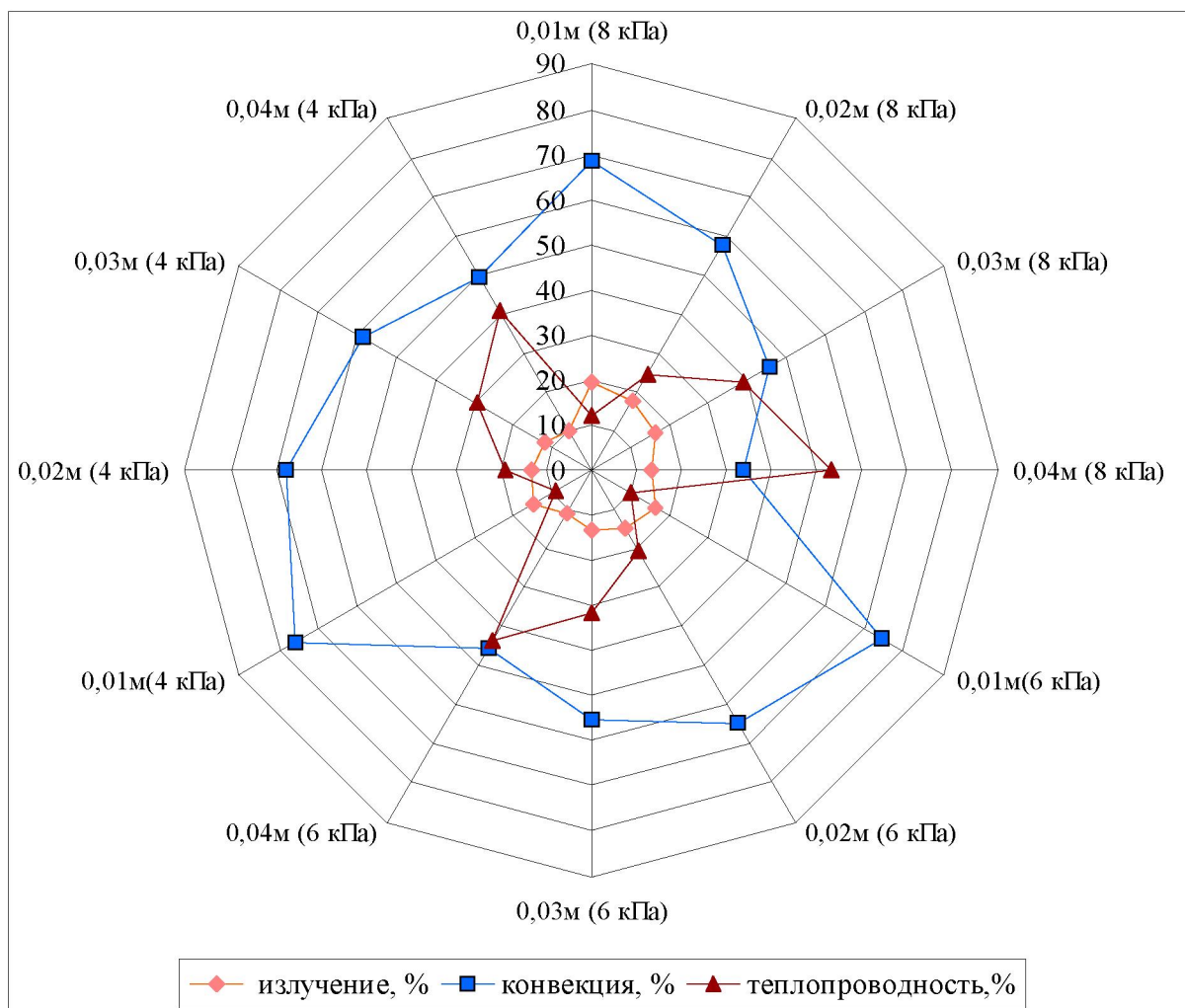


Рис. 4. Доля каждого вида теплообмена (%) при вакуумной сушке клубней топинамбура при температуре нагрева среды 55 °С

пропорционально. При 8 кПа их значения увеличиваются с 11,86 до 53,13 %, при 6 кПа – с 9,81 до 43,62 %, при 4 кПа – с 9,17 до 40,46 %.

Таким образом, изучив изменение долевых значений составляющих теплообмена при вакуумной сушке, протекающей при низком и среднем вакууме, можно заключить следующее:

- доля лучистого теплообмена практически не зависит от степени разрежения вакуумируемой среды (в заданном интервале), но уменьшается при повышении температуры нагрева среды и росте высоты слоя материала;

- значения конвективных составляющих с повышением температуры нагрева вакуумируемой среды несколько повышаются, но от степени ее разрежения (в заданном интервале) не за-

висят; с ростом высоты слоя значения конвективных составляющих убывают;

- доля потока, подводимого теплопроводностью, с ростом высоты слоя возрастает прямо пропорционально, но при повышении температуры нагрева независимо от давления его значения уменьшаются;

- при высотах слоя высушиваемого материала (0,01÷0,02) м в тепловом потоке преобладает конвективная составляющая, а при высотах слоя (0,03÷0,04) м – составляющая теплопроводности;

- в среднем по высоте слоя при температуре нагревателей 35 °С доминирует такой вид теплообмена, как теплопроводность, при 55 °С – конвекция, а при 45 °С их значения одинаковы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков П.А. Влияние лучистой составляющей на характер теплообмена при сублимации в вакууме // Инженерно-физический журнал. 1962. Т. 5, №12. С. 80-83.
2. Касымбеков Б.А., Ханжаров Н.С., Абдижаптарова Б.Т. Теплообмен при вакуумно-атмосферной сушке твердо-влажных и жидко-вязких продуктов // Вестник НАН РК. 2005. №4. С. 97-100.
3. Касымбеков Б.А., Ханжаров Н.С., Абдижаптарова Б.Т. Исследование вакуумно-атмосферной сушки термолabileльных материалов // Вестник НАН РК. 2005. №5. С. 31-36.
4. Смольский Б.М., Новиков П.А. О механизме тепло- и массообмена при сублимации тел в разреженной среде // Инженерно-физический журнал. 1961. Т. 5, № 11. С. 41-47.
5. Девойно А.Н. Основные закономерности теплообмена в разреженном газе при естественной конвекции // Инженерно-физический журнал. 1961. Т. 4, № 6. С. 70-77.

6. Kyte I.R., Madden A.I. and Piret L. // Chem. Ing. Progress. 1953. № 12. P. 29-33.

7. Ермакова Е.А. О механизме тепло- и массообмена при сублимации льда под вакуумом // Инженерно-физический журнал. 1958. Т. 11, № 11. С. 73-79.

Резюме

Ірі дисперсті материалдардың вакуумдық кептіру тәсілінің жылуалмасуы қарастырылған. Кептіру режи-міне байланысты жылуалмасудың әр бөлігінің өзгеруі зерттелген.

ШФ КазАТК им. М. Тынышпаева,
ЮКТУ им. М. Ауезова, г. Шымкент;

Министерство охраны окружающей
среды РК, г. Астана

Поступила 17.08.07г.