

## **Основные закономерности кинетики процесса конвективно-радиационной сушки кураги**

**Усманов И.И.**

[petrobars.spb@mail.ru](mailto:petrobars.spb@mail.ru)

**Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий**

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса массоуноса при сушке плодов кураги. В частности, зависимость уноса влаги с поверхности кураги при свободной конвекции и различной температуре теплоносителя, а так же зависимость уноса свободной влаги с поверхности единичного плода кураги в зависимости от времени процесса при различных температурах теплоносителя и мощностях ИК облучения. Кроме того, получены графики соответствующих зависимостей скоростей массоуноса и хода температурных кривых для поверхности плода кураги. Как итог получена классическая кривая кинетики сушки.*

**Ключевые слова:** влажность материала, скорость массоуноса, температура, теплоноситель, мощность ИК-излучения, кинетика сушки.

**The main regularities of the kinetics of the convective-radiative drying  
apricots**

**Usmanov I.I., petrobars.spb @ mail.ru**

**St. Petersburg State University**

**Refrigeration and Food Engineering**

The results of experimental studies in the process of drying fruit mass transfer dried apricots. In particular, the dependence of entrainment of moisture from the surface of the dried apricots in free convection and different coolant temperature, as well as the dependence of entrainment of free moisture on the surface of a single

fruit apricots, depending on the time of the process at different temperatures and coolant capacity of IR irradiation. In addition, the diagrams of the dependence of the velocity and temperature mass transfer curves for the fruit dried apricots. As a result, we obtain the classical curve of the kinetics of dehydration.

**Keywords:** humidity of the material, the rate mass transfer, temperature, coolant, power infrared radiation, drying kinetics.

Основные особенности и характер протекания процесса осушки влажных материалов наиболее полно отражаются кривыми осушки (кривыми изменения во время средней влажности материала) кривыми скорости осушки в координатах скорость осушки – влажность материала и температурными кривыми.

Выполненные с помощью разработанной опытной установки экспериментальные исследования процесса удаления влаги с поверхности влажной кураги позволяют провести параметрический анализ влияния отдельных факторов на скорость процесса осушки. Результаты опытов обрабатывались в виде совмещенных кривых осушки  $W=F(\tau)$  и кривых кинетики нагрева поверхности кураги  $\Theta = F(\tau)$  с учетом влияния источника инфракрасного излучения различной мощности, а также в виде кривых скорости осушки, которые строились методом дифференцирования по времени кривых осушки. Для выяснения качественных закономерностей процесса удаления поверхностной влаги рассмотрим кривые кинетики нагрева и осушки единичного плода кураги и засыпки, полученные нами экспериментальным путем.

При мойке кураги происходит насыщение (гидратация) поверхностного слоя кураги влагой, глубина проникновения которой составляет величину 1-2 мм. Необходимо отметить, что кроме гидратации происходит нагрев кураги в процессе мойки от моющей среды.

На рис.1. представлен график зависимости уноса влаги с поверхности кураги при свободной конвекции для различной температуры теплоносителя.

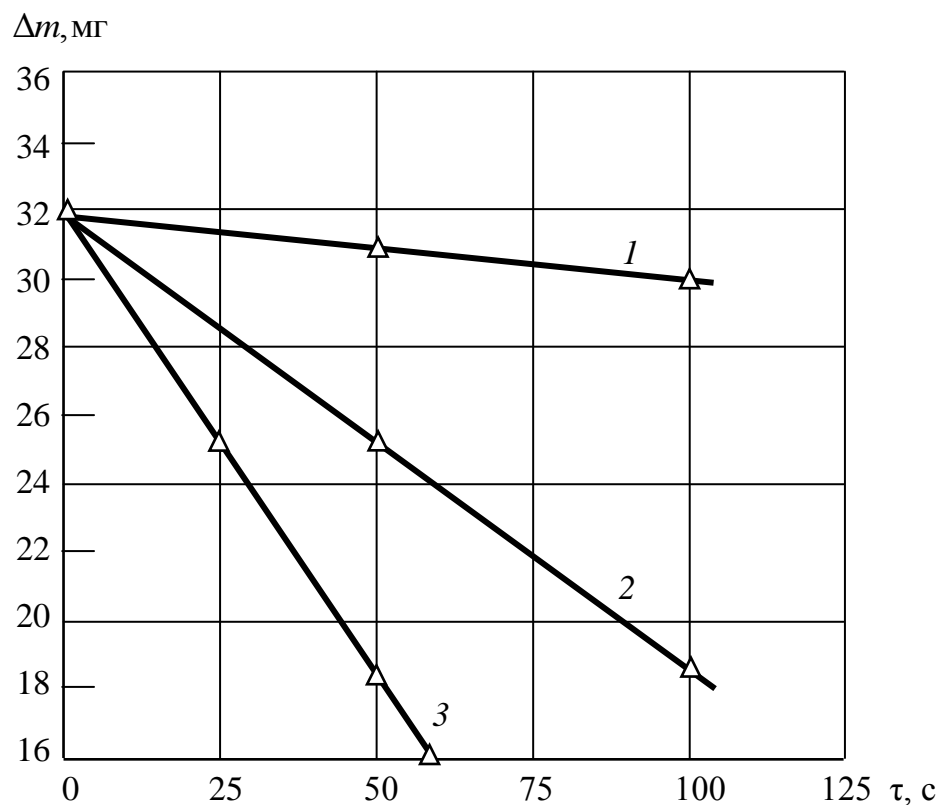


Рис. 1. Унос влаги с поверхности кураги при свободной конвекции для температур теплоносителя: 1- 20°C, 2- 30°C, 3- 45°C.

Приведенные данные подтверждают сложившуюся теорию о постоянстве скорости сушки в первом её периоде. При этом следует отметить, что наиболее интенсивно процесс уноса влаги свободной конвекцией происходит в области температур 40-45°C. В количественном измерении доля уносимой влаги достигает при 0,2% за одну минуту при температуре плода 45°C, при температуре кураги 20°C интенсивность массоуноса в 10-12 раз ниже.

Таким образом, еще раз подтверждается целесообразное значение температуры моющей среды 40°C, так как в процессе транспортировки на межоперационных переходах может быть удалено за счет естественной конвекции менее 10% всего объема удаляемой влаги.

Кроме того в зону технологического цикла осушки влажный продукт поступает в предварительно нагретом состоянии, что снижает энергоемкость завершающего процесса осушки.

В части корректного математического описания процесса совместного теплопереноса полученные данные позволяют сформулировать соответствующие начальные и граничные условия по температуре в начале процесса и на границах продукта.

На рисунках 2 - 6 представлены экспериментальные данные по зависимости массоуноса и температуры поверхности кураги от времени для различных температур теплоносителя и трех уровней интенсивности ИК облучения:

$$t = 23^{\circ}\text{C},$$

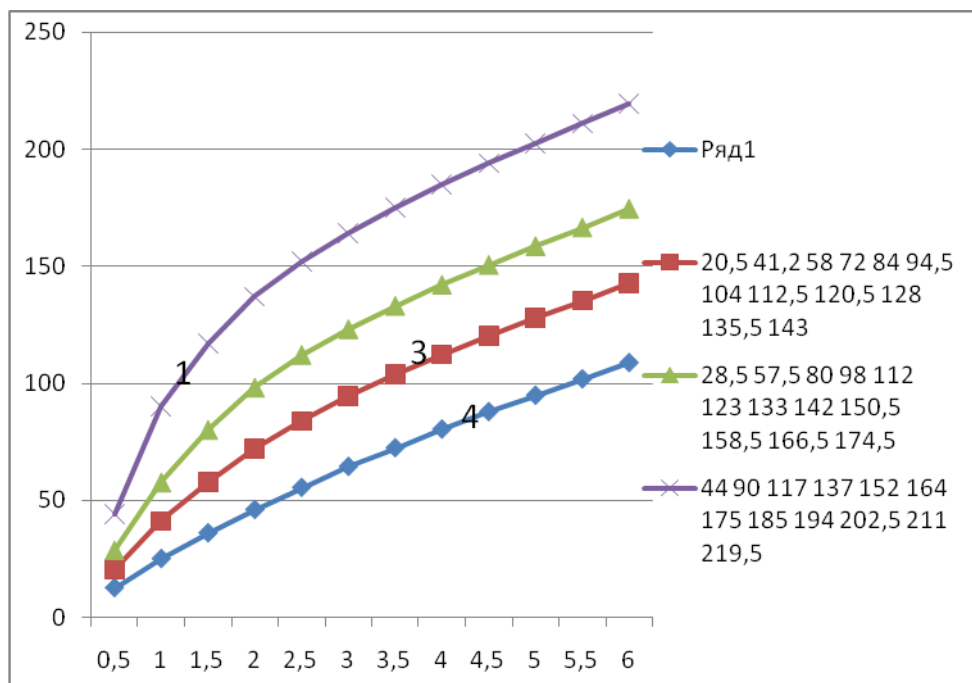
$$t = 60^{\circ}\text{C},$$

$$W = 7000 \text{ Вт/м}^2,$$

$$W = 2600 \text{ Вт/м}^2,$$

$$W = 4800 \text{ Вт/м}^2,$$

m, мг



τ, МИН

Рис.2. Зависимость уноса свободной влаги с поверхности единичного плода кураги от времени при  $t = 23^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 45\%$ ,  $S = 7,5 \text{ см}^2$  и мощности ИК облучения: (Ряд:4-7000, 3-4800, 2-2600, 1-0 Вт/м<sup>2</sup>).

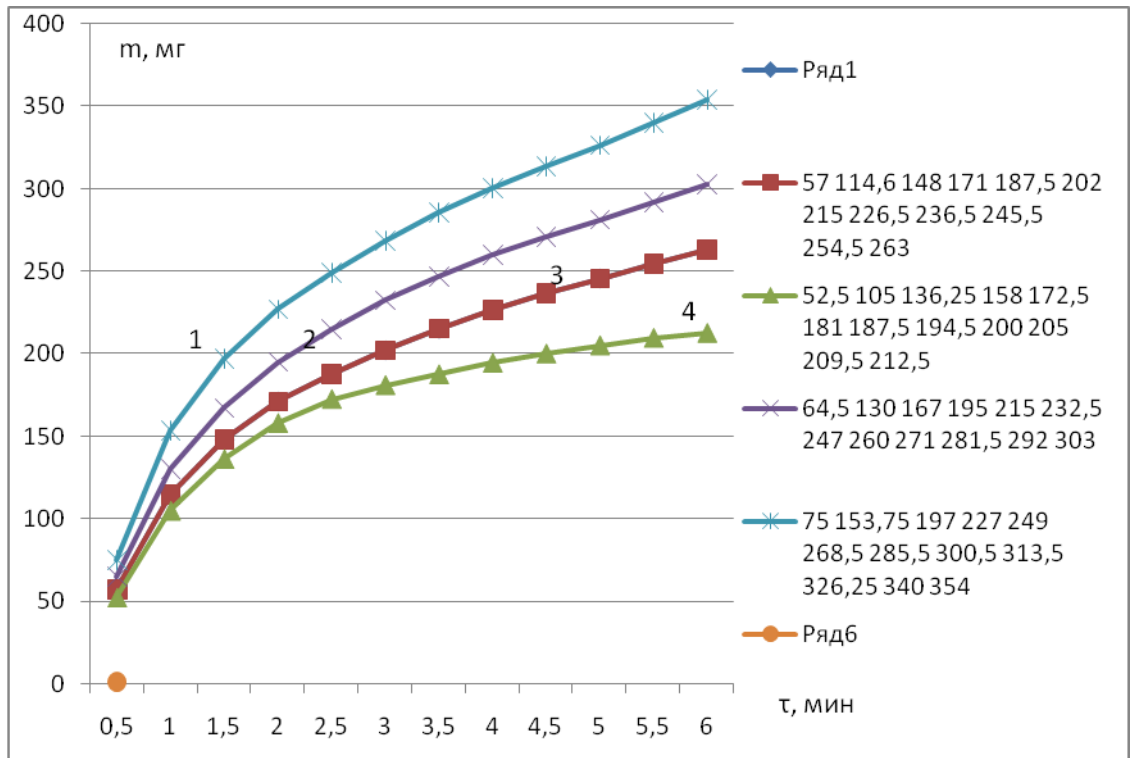


Рис.3. Зависимость уноса свободной влаги с поверхности единичного плода кураги от времени при  $t = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 1,1 \text{ м/с}$ ,  $\alpha = 45\%$ ,  $S = 7,5 \text{ см}^2$  и мощности ИК облучения: 1-7000, 2-4800, 3 – 2600, 4 – 0 Вт/м<sup>2</sup>.

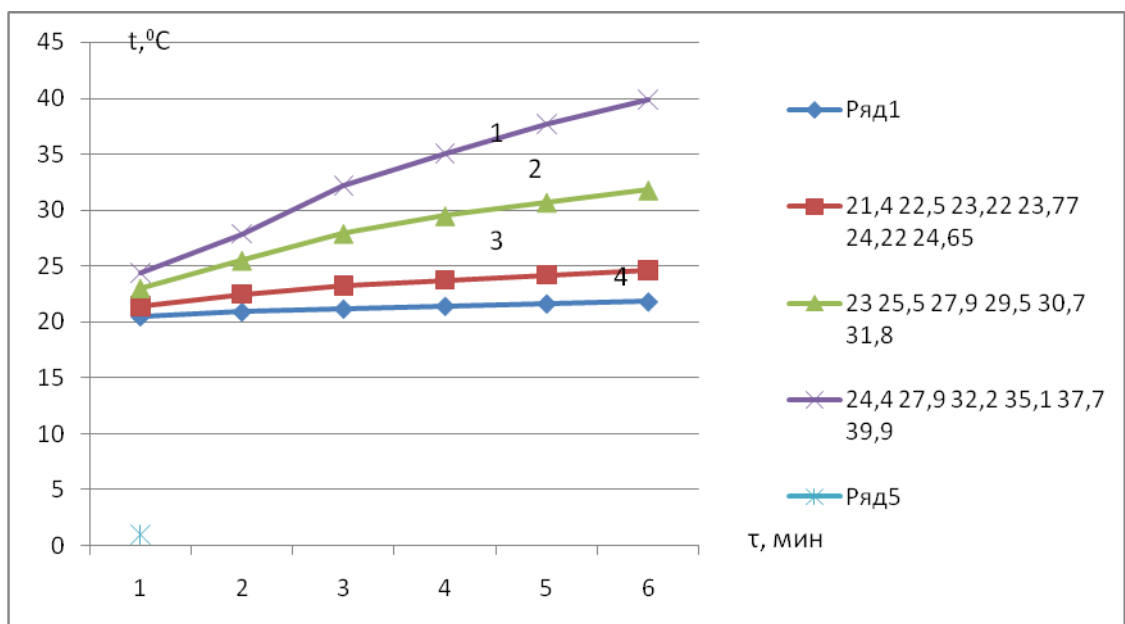


Рис.4. Зависимость температуры поверхности единичного плода кураги, покрытого влагой, от времени при  $t=23^{\circ}\text{C}$ ,  $V=1,1$  м/с,  $\alpha = 45\%$ ,  $S=7,5$  см<sup>2</sup> и мощности ИК облучения: 1-7000, 2-4800, 3 – 2600, 4 – 0 Вт/м<sup>2</sup>.

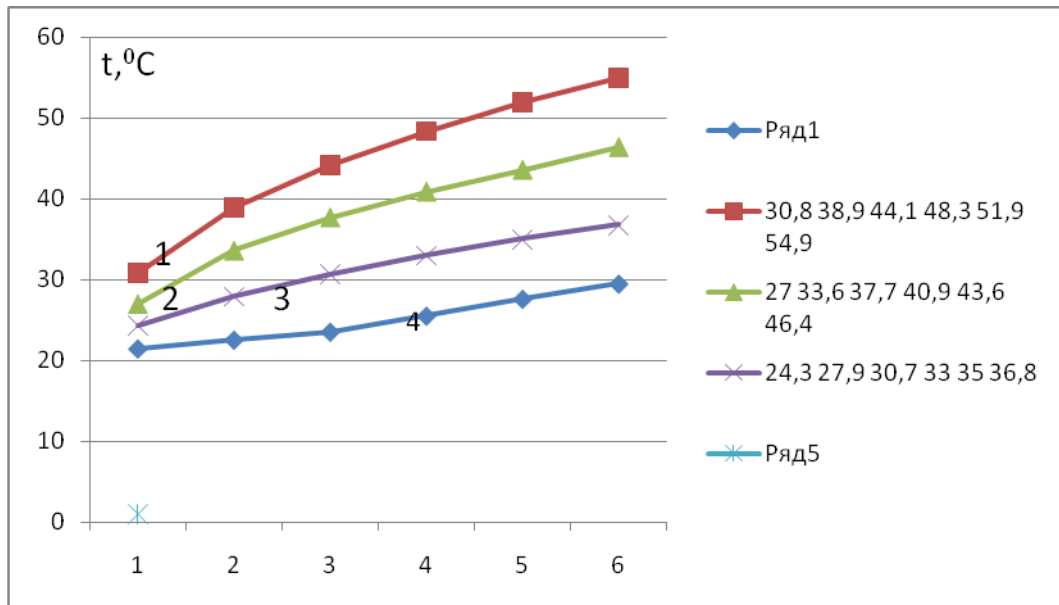


Рис.5. Изменение температуры поверхности единичного плода кураги покрытого влагой в зависимости от времени при  $t=60^{\circ}\text{C}$ ,  $V=1,1$  м/с, см<sup>2</sup> и мощности ИК облучения: 1-7000, 2-4800, 3 – 2600, 4 – 0 Вт/м<sup>2</sup>.

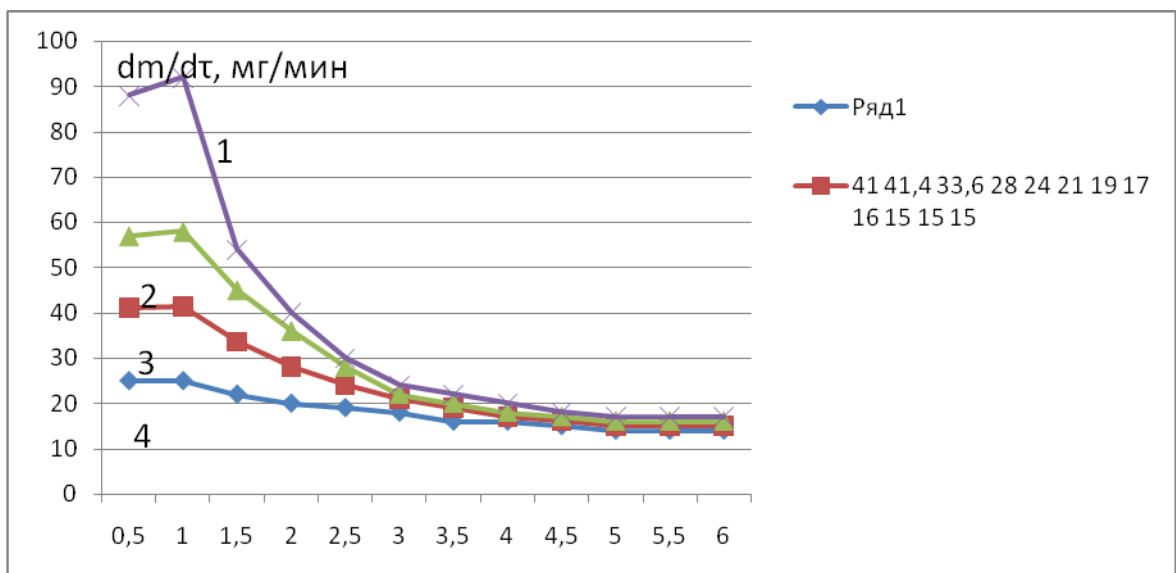


Рис.6. Зависимость скорости уноса свободной влаги с поверхности единичного плода кураги в зависимости от времени при  $t=23^{\circ}\text{C}$ ,  $V=1,1$  м/с, и мощности ИК облучения: 1-7000, 2-4800, 3 – 2600, 4 – 0 Вт/м<sup>2</sup>.

На рисунке 7. приведены зависимости скорости уноса избыточной влаги с поверхности плода кураги, полученные путем графического дифференцирования соответствующих кривых уноса влаги.

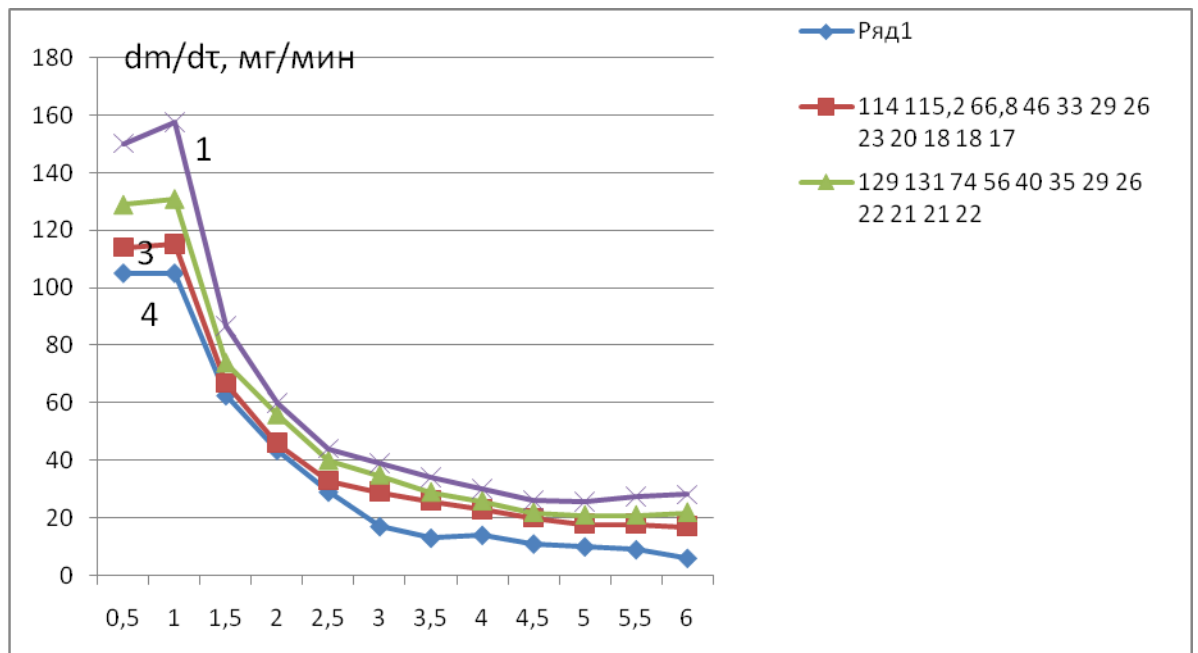


Рис.7. Зависимость скорости уноса свободной влаги с поверхности единичного плода кураги от времени при  $t=60^{\circ}\text{C}$ ,  $V=1,1$  м/с,  $\alpha = 45\%$ ,  $S=7,5$  см<sup>2</sup> и мощности ИК облучения: 1-7000, 2-4800, 3 – 2600, 4 – 0 Вт/м<sup>2</sup>.

Как следует из приведенных данных рисунков 6. и 7., в рассматриваемом случае процесс осушки кураги, соответствует характерным кинетическим кривым процесса сушки влажного капиллярно-пористого материала при отсутствии ИК – облучения и состоит из трех периодов: начальной стадии осушки, первого и второго периодов осушки.

В начальной стадии осушки осуществляется прогрев слоя влаги. Прогрев происходит вследствие того, что температура поверхности ниже температуры теплоносителя. Для тонких материалов стадия прогрева очень

мала и на кривых скорости сушки слабо заметна. Это относится и к сушке кураги, покрытой тонким слоем влаги.

При отсутствии инфракрасного облучения в начале процесса сушки в стадии прогрева скорость сушки быстро увеличивается (на рисунке не показано) до максимального значения в периоде постоянной скорости сушки, а затем остается постоянной (горизонтальный участок кривой).

При этом необходимо иметь в виду то важное обстоятельство, что при дополнительном воздействии инфракрасного излучения процесс сушки не вполне соответствует характерным кинетическим кривым. В первом периоде сушки наблюдается рост скорости массоуноса, пропорциональный величине мощности источника. Указанный факт является существенным отличием в сравнении с процессами, протекающими без ИК- источника энергии, описанными в литературе. Температура поверхностного слоя влажной кураги в первом периоде сушки равна температуре среды, измеренной по мокрому термометру. Водяные пары у поверхности плодов находятся в насыщенном состоянии, при этом испарение влаги происходит так же, как с открытой поверхности воды.

Скорость процесса сушки в этот период определяется только условиями тепло- и влагообмена материала с окружающей средой, т.е. зависит от параметров режима сушки (температуры, относительной влажности, скорости фильтрации воздуха, мощности источника инфракрасного излучения).

Ход температурных кривых приведенных на рисунках 4. и 5. характеризуется ростом по закону близкому к линейному при слабом ИК облучении и по параболическому закону при интенсивном ИК- воздействии.

Что касается данных рисунка 8, отражающего процесс массоуноса избыточной влаги при ИК облучении, то его отличительной особенностью является отсутствие участка постоянной скорости сушки – первый период. Для этого участка (АВ) наблюдается интенсивный рост скорости массоуноса с плавным переходом ко второму периоду убывающей скорости сушки



(участок ВД), который имеет, как и в предыдущем случае два характерных отрезка ВС – участок интенсивно падающей скорости сушки и СД – участок медленно убывающей скорости массоуноса.

Необходимо отметить, что интенсивность нарастания скорости массоуноса в первом периоде сушки прямопропорциональна мощности ИК – облучения.

$dm/dt$ , МГ/МИН.

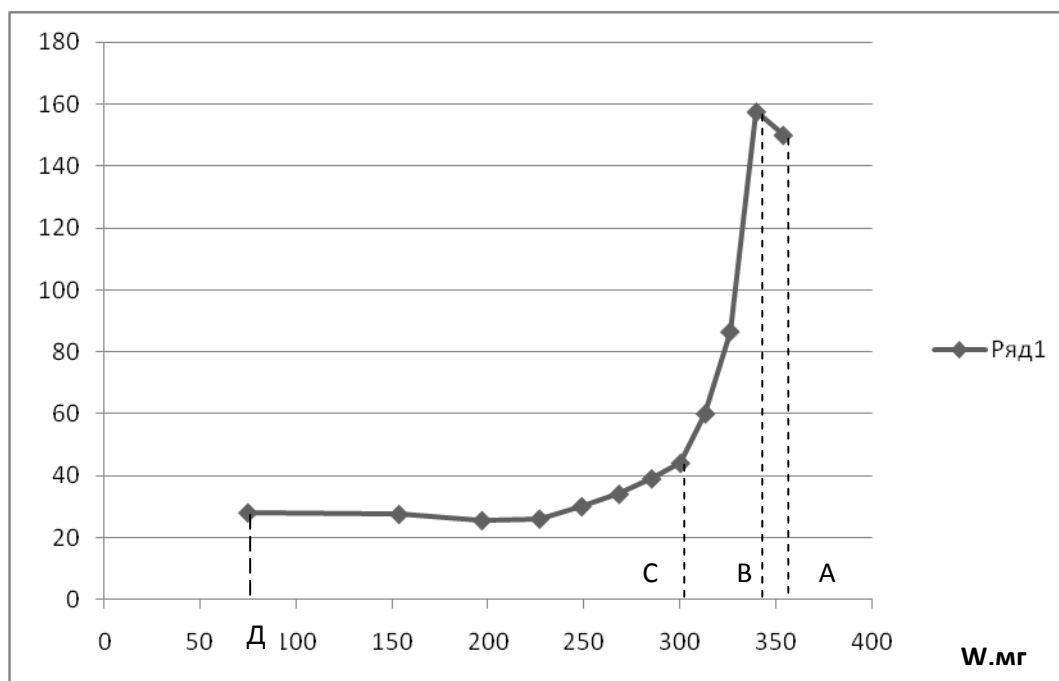


Рис. 8. Зависимость скорости уноса массы от количества влаги удаленной с поверхности плода кураги  $T_c = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $V=1,1$  м/с,  $W=7000$  Вт/м<sup>2</sup>

### Список литературы:

1. Шервуд Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Погифорд, Ч. Уилки.- /М.: Химия, 1982.- с.34-234.
2. Лыков А.В. Теория сушки.- М.: Энергия, 1969.- 471 с.
3. Ben Mabrouk, Belghith A Numerikal Simulation of the drying of a deformable material: Evaluation of the diffusion coefficient // Druig Technol.. – 1995.- 13, № 8-9.- Р. 1789-1805.

4. Муштаев В.И. Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем: Учеб. пособие для вузов / В.И. Муштаев, А.С. Тимошин, В.Я. Лебедев.- М.: Химия, 1991.- 344 с.

5. Де Гроот С.Р. Неравновесная термодинамика / С.Р. Де Гроот, п. Мазур.- м.: Мир, 1964.- 620 с.