

УДК 66.047:664.87.036.021.3/.4  
DOI: 10.15587/2312-8372.2020.195863

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ  
ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ КОФЕЙНОГО ШЛАМА**

**Бурдо О. Г., Безбах И. В., Шишов С. В., Зыков А. В., Гаврилов А. В.,  
Всеволодов А. Н., Сиротюк И. В., Терзиев С. Г.**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ  
ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ КАВОВОГО ШЛАМУ**

**Бурдо О. Г., Безбах І. В., Шишов С. В., Зиков О. В., Гаврілов А. В.,  
Всеволодов О. М., Сиротюк І. В., Терзієв С. Г.**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF INFRARED DRYING  
OF SPENT COFFEE GROUNDS**

**Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrillov A., Vsevolodov O.,  
Sirotyuk I., Terziev S.**

*Объектом исследования является процесс сушки кофейного шлама. В условиях современного производства остро ставятся вопросы рационального использования энергии во всех процессах пищевой технологии, включая сушку. Во многих пищевых технологиях используется в 2–3 раза больше энергии, чем ее физически необходимо на процесс. Этим определяется энергоемкость производства и качество продуктов. Процессы сушки относятся к наиболее энергоемким, и во многих случаях доля энергии в себестоимости продукции составляет до 30 %. При сушке кофейного шлама используют в основном конвективные сушилки, энергозатраты которых составляют 5 МДж/кг удаленной влаги и выше. На испарение влаги при конвективной сушке расходуется 40 % подведенной энергии. Также значительным недостатком конвективных сушилок является выброс отработанного теплоносителя в атмосферу, который имеет теплосодержание всего лишь на 10–15 % меньше, чем горячий воздух, подаваемый в сушильную камеру. В работе предлагается использование инфракрасного излучения для сушки кофейного шлама в установках периодического и непрерывного действия. Это позволит в перспективе снизить удельные энергозатраты. В ходе исследования определено влияние интенсивности энергетического подвода, температуры, скорости потока воздуха, толщины слоя продукта и удельной нагрузки на кинетику периодической инфракрасной сушки кофейного шлама. Определено влияние интенсивности энергетического подвода, удельной нагрузки, скорости ленты, количества инфракрасных модулей на кинетику непрерывной инфракрасной сушки кофейного шлама. Проведено сравнение результатов с конвективной сушкой по параметрам удельного энергопотребления.*

Особенностью применения инфракрасного излучения является большая эффективность и высокая скорость удаления влаги из поверхностных слоев кофейного шлама, и как следствие, увеличение производительности способа сушки, снижение удельных энергозатрат. Полученные в ходе работы удельные энергозатраты при инфракрасной сушке кофейного шлама составили 3,2 МДж/кг. Это ниже существующих конвективных сушилок.

**Ключевые слова:** инфракрасная сушка, кофейный шлам, кинетика сушки, установки периодического и непрерывного действия, удельные энергозатраты.

Об'єктом дослідження є процес сушіння кавового шламу. В умовах сучасного виробництва гостро ставляться питання раціонального використання енергії в усіх процесах харчової технології, включаючи сушіння. У багатьох харчових технологіях використовується в 2–3 рази більше енергії, ніж її фізично необхідно на процес. Цим визначається енергоємність виробництва і якість продуктів. Процеси сушіння відносяться до найбільш енергоємних, і в багатьох випадках частка енергії в собівартості продукції складає до 30 %. При сушінні кавового шламу використовують в основному конвективні сушарки, енерговитрати яких становлять 5 МДж/кг видаленої вологи і вище. На випаровування вологи при конвективному сушінні витрачається 40 % підведеної енергії. Також значним недоліком конвективних сушарок є викид відпрацьованого теплоносія в атмосферу, який має тепловміст всього лише на 10–15 % менше, ніж гаряче повітря, що подається в сушильну камеру. В роботі пропонується використання інфрачервоного випромінювання для сушіння кавового шламу в установках періодичної та безперервної дії. Це дозволить в перспективі знизити питомі енерговитрати. В ході дослідження визначено вплив інтенсивності енергетичного підведення, температури, швидкості потоку повітря, товщини шару продукту і питомого навантаження на кінетику періодичної інфрачервоного сушіння кавового шламу. Визначено вплив інтенсивності енергетичного підведення, питомого навантаження, швидкості стрічки, кількості інфрачервоних модулів на кінетику безперервного інфрачервоного сушіння кавового шламу. Проведено порівняння результатів з конвективним сушінням за параметрами питомого енергоспоживання. Особливістю застосування інфрачервоного випромінювання є більша ефективність і висока швидкість видалення вологи з поверхневих шарів кавового шламу, і як наслідок, збільшення продуктивності способу сушіння, зниження питомих енерговитрат. Отримані в ході роботи питомі енерговитрати при інфрачервоному сушінні кавового шламу склали 3,2 МДж/кг. Це нижче існуючих конвективних сушарок.

**Ключові слова:** інфрачервоне сушіння, кавовий шлам, кінетика сушіння, установки періодичної та безперервної дії, питомі енерговитрати.

## 1. Введение

В последнее время техника обезвоживания продуктов и материалов значительно опережает теоретические положения сушки [1]. Не только классическая литература по проблемам сушки [2], но и специальная [3, 4] не

дают конкретных рекомендаций по проектированию комбинированных принципов сушки, установок с электромагнитным подводом энергии. Вместе с тем, именно такие установки активно прогрессируют и характеризуются серьезными проблемами в моделировании. Поэтому, пока единственным надежным путем их исследований является эксперимент.

Кофейный шлам считается одним из самых распространенных биоресурсов в мире для использования в качестве зеленой энергии. Биодизель, биоэтанол, биомасло и топливные пеллеты являются биотопливом, полученным из этих отходов [5]. Чтобы получить их, кофейный шлам необходимо высушить из-за высокого содержания влаги.

Также шлам обладает высоким потенциалом из-за его полезных свойств для здоровья, однако, из-за высокого содержания воды, необходимо стабилизировать его, не влияя на биоактивные свойства.

В условиях современного производства остро ставятся вопросы рационального использования энергии во всех процессах пищевой технологии, включая сушку. Во многих пищевых технологиях используется в 2–3 раза больше энергии, чем ее физически необходимо на процесс. Этим определяется энергоемкость производства и качество продуктов. Поэтому актуальным является исследование процесса сушки кофейного шлама, применение новых способов сушки, которые позволят снизить энергозатраты.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объектом исследования* является процесс сушки кофейного шлама.

Процессы сушки относятся к наиболее энергоемким, и во многих случаях доля энергии в себестоимости продукции составляет до 30 %. При сушке кофейного шлама используют в основном конвективные сушилки, энергозатраты которых составляют 5 МДж/кг удаленной влаги и выше. На испарение влаги при конвективной сушке расходуется 40 % подведенной энергии. Также значительным недостатком конвективных сушилок является выброс отработанного теплоносителя в атмосферу, который имеет теплосодержание всего лишь на 10–15 % меньше, чем горячий воздух, подаваемый в сушильную камеру.

## **3. Цель и задачи исследования**

*Цель работы* – провести экспериментальные исследования кинетики инфракрасной сушки (ИК) кофейного шлама.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Определить влияние режимных параметров (интенсивности энергетического подвода, температуры, скорости потока воздуха, толщины слоя продукта и удельной нагрузки) на кинетику периодической ИК сушки кофейного шлама.

2. Определить влияние режимных параметров (интенсивности энергетического подвода, удельной нагрузки, скорости ленты, количества ИК модулей) на кинетику непрерывной ИК сушки кофейного шлама.

## **4. Исследование существующих решений проблемы**

Сушка в большинстве случаев энергоемкий процесс, который обычно

приводит к заметным изменениям характеристик качества продукта из-за длительного времени сушки при высоких температурах. Процесс сушки пищевых материалов является чрезвычайно сложным, включающим сопряженные переходные механизмы процессов передачи тепла, массы и импульса, сопровождаемые физическими, химическими и фазовыми превращениями [6–8].

Для сушки кофейного шлама используют разные способы – конвективный, сверхвысокочастотный (СВЧ), инфракрасный (ИК), контактный. Они имеют свои преимущества и недостатки.

В работе [9] анализируется кинетика сушки кофейного шлама в конвективной сушилке при различных температурах: 100, 150, 200 и 250 °С, и толщине образцов: 5, 10, 15 и 20 мм. В результате кривые сушки сопоставлены с основными математическими моделями при сушке сельскохозяйственных продуктов. Получены эффективные коэффициенты диффузии влаги в диапазоне между  $1,29 \cdot 10^{-9}$  до  $28,8 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Показано, что скорость сушки достаточно высокая, однако не рассчитаны удельные энергозатраты на процесс и не ставилась задача исследовать ИК сушку для шлама. Как показывают исследования [10, 11], удельные энергозатраты на процесс конвективной сушки составляют от 5 МДж/кг до 9 МДж/кг и выброс отработанного теплоносителя в атмосферу.

В рамках исследования [12] для сушки кофейного шлама разработана полочная сушилка с воздушным компрессором. Применение компрессора позволяет использовать бесплатное отработанное тепло для сушки. Разработана модель, позволяющая учитывать влияние максимального количества установленных поддонов и толщины слоя на мощность сушилки. Экспериментальное определение продолжительности сушки для кофейного шлама с различной толщиной показало, что каждый сантиметр увеличения толщины слоя увеличивал продолжительность сушки в 3 раза. Сушилка выполняет 6 циклов в течение обычных часов работы кафе (12 часов) и суточная производительности сушилки 5400 г. При этом остается неизвестным применение сушилки для производственных масштабов, при количестве шлама среднего завода около 2 тонн в смену [13].

В работе [14] проведены исследования микроволновой сушки брикета из кофейного шлама в сочетании с минеральными добавками при различной подводимой мощности (119–700 Вт). В качестве добавок применяли 10 % хлорид натрия, 10 % сульфат натрия и 10 % лигнита. По сравнению с необработанным брикетом, требуемое время сушки брикета с добавками Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaCl при 385 Вт уменьшилось на 38 % и 18 %. Соответственно, тогда как время сушки увеличилось на 9 % с добавлением мелкого лигнита. Авторами не рассмотрена возможность ИК-сушки в условиях тонкого слоя.

В работе [15] основной целью было оценить влияние различных условий конвективной сушки на некоторые технологические и функциональные свойства отработанного кофейного шлама и определить кинетику термического разложения хлорогеновых кислот. Эксперименты проводились при температуре воздуха 40–60 °С, расходе воздуха 1,0–2,0 м/с и толщине слоя 0,01–0,02 м. Были определены эффективный коэффициент диффузии, влажность, активность воды, способность удерживать воду и масло, антиоксидантная способность. В целом, делается вывод, что процесс

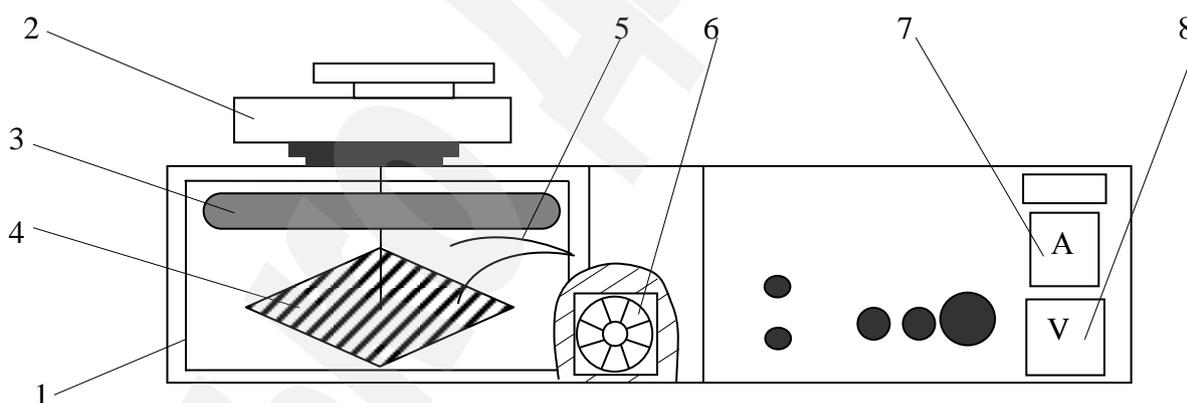
конвективной сушки является допустимым методом обработки кофейного шлама, поскольку он позволяет сохранять антиоксидантные соединения, потенциально полезные для здоровья, обеспечивая стабильное низкое содержание влаги, которое можно использовать в пищевых продуктах. Однако в данной работе не рассмотрена возможность периодической и непрерывной ИК-сушки в условиях тонкого слоя.

В работе [16] проведены исследования режимов сушки инфракрасным излучением четырех типичных брикетов из биомассы (листья тополя, хлопкового стебля, кофейного шлама и коры эвкалипта). Было рассмотрено влияние температуры источника излучения (100–200 °С) на теплопередачу образцов. При повышении температуры от 100 до 200 °С время, необходимое для сушки четырех брикетов из биомассы, уменьшилось примерно на 59–66 %, а удельные энергозатраты составляли 2,2–3,5 МДж/кг. Опыты проведены на брикетах, хотя применение ИК-сушки в условиях тонкого слоя должно дать больший эффект, так как излучение будет эффективней проникать в продукт.

Анализ литературных данных показал, что выбранное направление экспериментальных исследований является перспективным и определяется необходимостью изучить кинетику массопереноса при сушке кофейного шлама в установках с ИК генераторами энергии. Планируется провести экспериментальные исследования периодических и непрерывных процессов обезвоживания в ИК-поле.

## 5. Методы исследований

Исследования в неподвижном слое продукта проводились на экспериментальном стенде (рис. 1). Стенд состоял из ИК камеры (1), электронных весов (2), двух ИК генераторов (3), кассеты с продуктом (4) системы измерения температуры продукта и воздуха в камере (5) и затрат энергии (7, 8).



**Рис. 1.** Схема лабораторной установки для исследования процесса инфракрасной (ИК) сушки в неподвижном слое: 1 – ИК камера; 2 – электронные весы; 3 – ИК генератор; 4 – кассета с продуктом; 5 – система измерения температуры продукта и воздуха в камере; 6 – вентилятор; 7 – амперметр; 8 – вольтметр

Движение воздуха в камере обеспечивалось вентилятором (6). Кассета квадратной формы со сторонами 200 мм и бортиками высотой 10 мм для продукта выполнена из металлической сетки. Кассета подвешивалась к весам

системой металлических тросов, длина которых регулировалась, что позволяло задавать необходимое расстояние продукта от излучателей в пределах 7–15 см.

Генераторами ИК излучения выступают кварцевые коротковолновые светлые элементы мощностью 550 Вт, которые обеспечивают практически за 30 секунд выход на температурный режим. Напряжение питания регулируется системой, состоящей из лабораторного трансформатора, амперметра класса точности 2,5 и вольтметра класса точности 1,5. По показаниям амперметра и вольтметра определяется потребляемая мощность.

Скорость воздуха на выходе из камеры измерялась электронным анемометром термогигрометром Testo 410-2 (Китай). Скорость воздуха изменяется в пределах 0,5–2,5 м/с путем регулирования с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) оборотов двигателя вентилятора. Система измерения температуры продукта и воздуха в камере состоит из двух хромель-капельных термопар, экранированных от действия ИК-излучения асбестовым шнуром и алюминиевой фольгой, и цифрового микровольтметра РТ-0193 (Китай) с компенсатором температуры окружающей среды.

Экспериментальная часть исследований включала серии опытов с различными нагрузками (весом продукта) и различной мощностью излучения, подводимого к камере. Результаты измерения веса и температуры слоя фиксировались программно-аппаратным комплексом стенда (рис. 2).



**Рис. 2.** Компьютеризированный стенд для исследования кинетики обезвоживания в электромагнитном инфракрасном поле

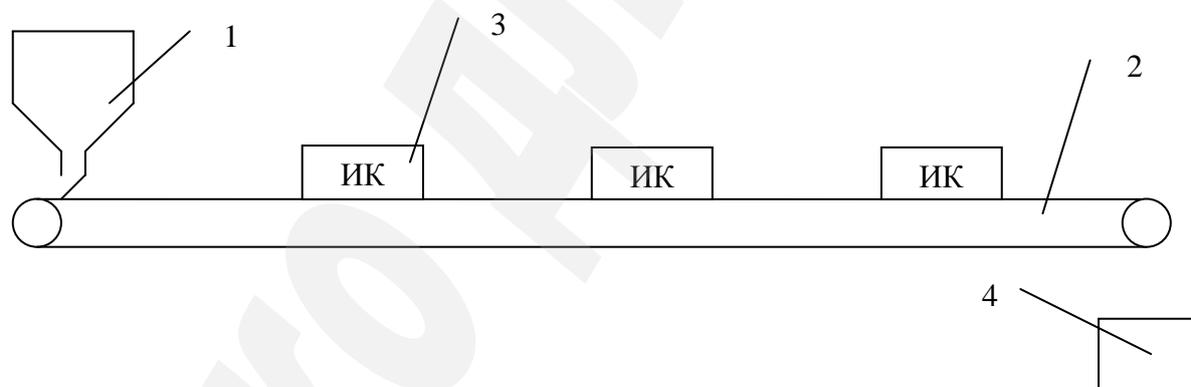
Электронные весы фиксируют изменение массы продукта. По уменьшению массы определяется количество удаленной влаги. Предварительно стандартными методами высушивания до постоянного веса определяется исходная влажность шлама и масса сухого вещества ( $m_{CP}$ ), которое в шламе остается постоянным. Таким образом, текущая влажность шлама ( $W_i$ ) определяется по значению текущей массы ( $m_i$ ) по формуле:

$$W_i = \frac{m_i - m_{CP}}{m_i}. \quad (1)$$

В качестве сырья исследовался кофейный шлам. Продукт размещался плотным слоем на подвесе весов в центре камеры. В непрерывном режиме компьютер обрабатывал информацию, которая поступала с весов и от термопар. На монитор выводились линии трендов массы продукта, линии сушки и скорости сушки продукта, температуры продукта, воздуха в камере, сухого и влажного термометров на выходе воздуха из камеры.

Непрерывные режимы обезвоживания изучались на ленточной ИК-сушилке (рис. 3). Стенд состоит из загрузочного бункера (1), ленточного конвейера (2), трех модулей ИК-обработки сырья (3). Модуль ИК обработки включает два кварцевых ИК-излучателя мощностью 550 Вт и сопротивлением 50 Ом каждый. Излучатели расположены на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера, а их мощность регулируется тиристорными регуляторами напряжения и контролируется электронным цифровым мультиметром UT202 (Китай). Влажность шлама определялась высушиванием проб до постоянной массы, пробы отбирали до и после каждого ИК-модуля. Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6–90 W (США), количество оборотов в котором регулируется потенциометром. Напряжение контролируется вольтметром ТЛ-4М (Китай).

Бункер загрузки снабжен шлюзом, который регулирует толщину слоя продукта на ленте в пределах 3–10 мм независимо от скорости ее движения.



**Рис. 3.** Экспериментальный стенд для исследования процессов инфракрасной (ИК) сушки пищевых продуктов: 1 – бункер; 2 – ленточный конвейер; 3 – ИК-излучатель; 4 – бункер готового продукта

Диапазон проведенных исследований приведен в табл. 1.

**Таблица 1**

Диапазон исследований инфракрасной (ИК) сушки кофейного шлама

Сырье	Удельная мощность ИК	Температура, $T$ , °С	Нагрузка, $g$ , кг/м <sup>2</sup>	Продолжительность обработки, $\tau$ , мин
Кофейный шлам	2,5–10 кВт/м <sup>2</sup>	45–130 °С	2,5–7,5	20–100

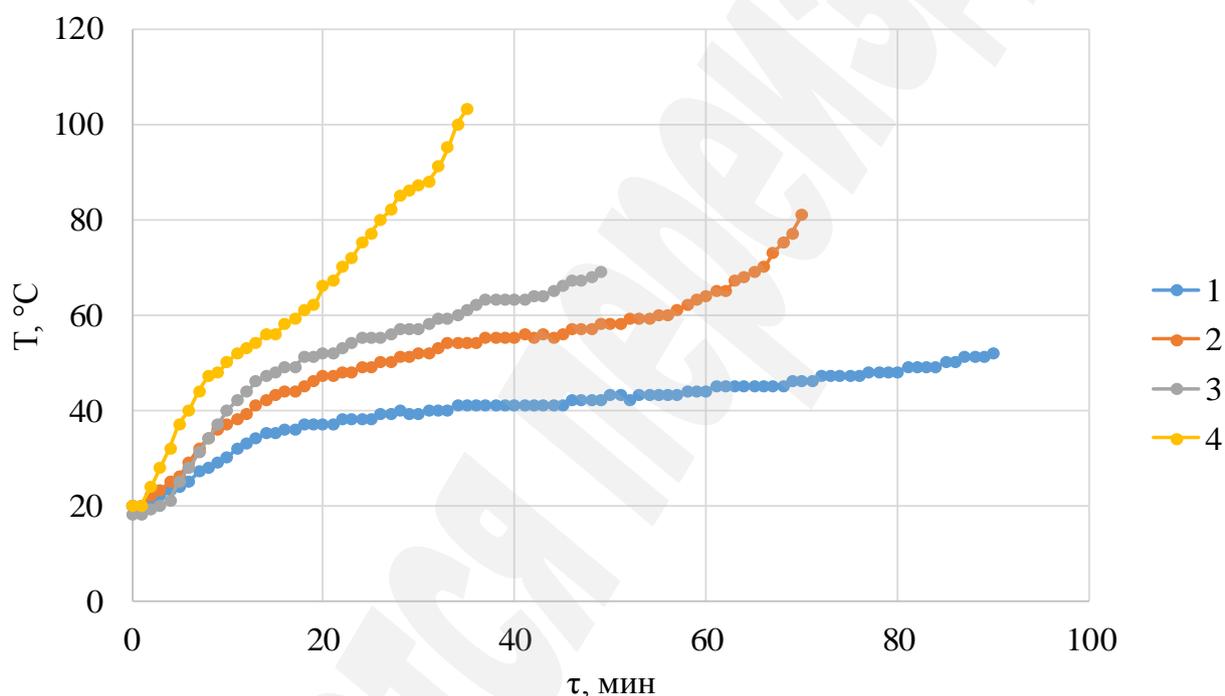
В камере размещался шлам удельной массой  $2,5\text{--}10\text{ кг/м}^2$  при скорости воздуха на выходе из камеры  $0\text{--}2,5\text{ м/с}$ .

Фиксировалась продолжительность обработки, температура и масса шлама во время обработки. Удельная нагрузка материала ( $g$ ) показывает массу ( $m$ ) продукта на единицу поверхности обработки ( $F$ ), а удельная мощность – ИК-энергию, которая расходуется на  $1\text{ м}^2$  обрабатываемой поверхности.

## 6. Результаты исследований

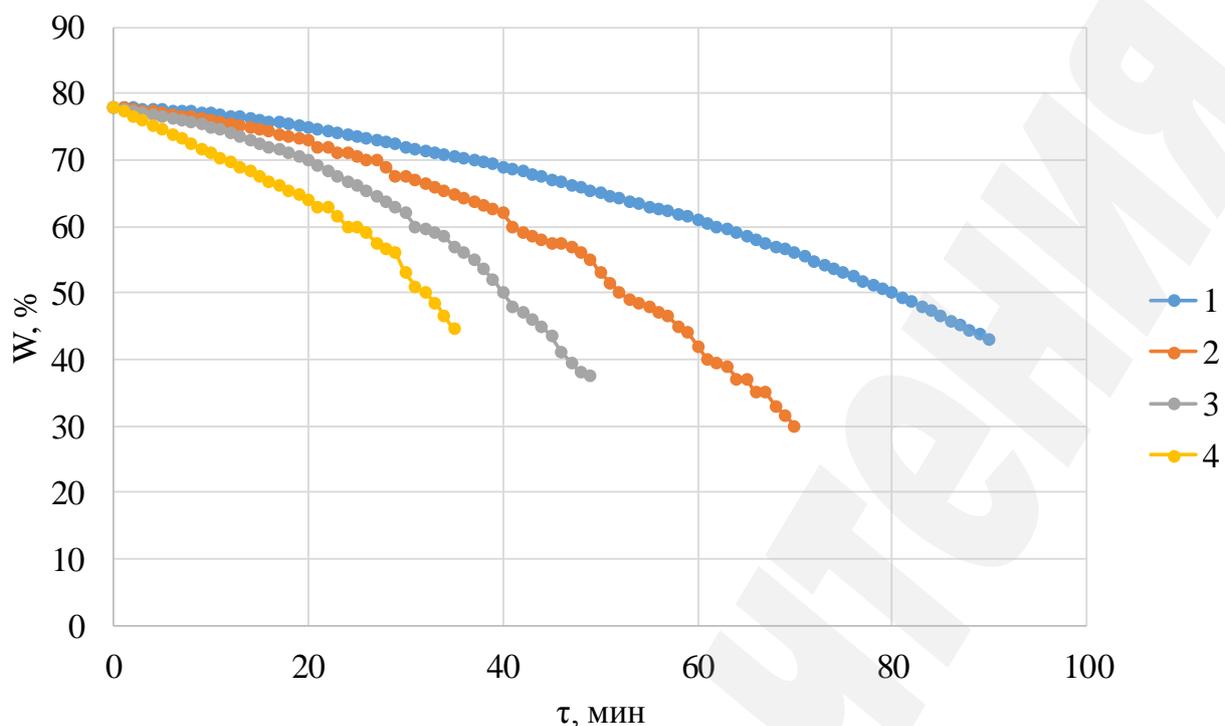
### 6.1. Исследования сушки шлама в неподвижном слое

Изучалось влияние подводимой мощности на скорость и температуру процесса сушки. Термограммы процесса и изменение влажности шлама по времени приведены на рис. 4, 5.



**Рис. 4.** Термограммы процесса сушки кофейного шлама при удельной мощности: 1 –  $2,5\text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $5\text{ кВт/м}^2$ ; 3 –  $7,5\text{ кВт/м}^2$ ; 4 –  $10\text{ кВт/м}^2$

Кофейный шлам хорошо поглощает инфракрасное излучение. На термограммах (рис. 4) наблюдается период медленного повышения температуры одновременно с понижением влажности продукта, которое указывает на то, что энергия ИК-излучения расходуется на испарение влаги. Это согласуется с тем, что вода поглощает инфракрасное излучение во всем ИК-спектре. Только в случае подвода  $10\text{ кВт/м}^2$  температура растет быстро и почти линейно, то есть энергии подводится значительно больше, чем необходимо для испарения влаги. И такой режим сушки можно считать неэффективным из-за несогласованности расхода энергии и количества продукта.



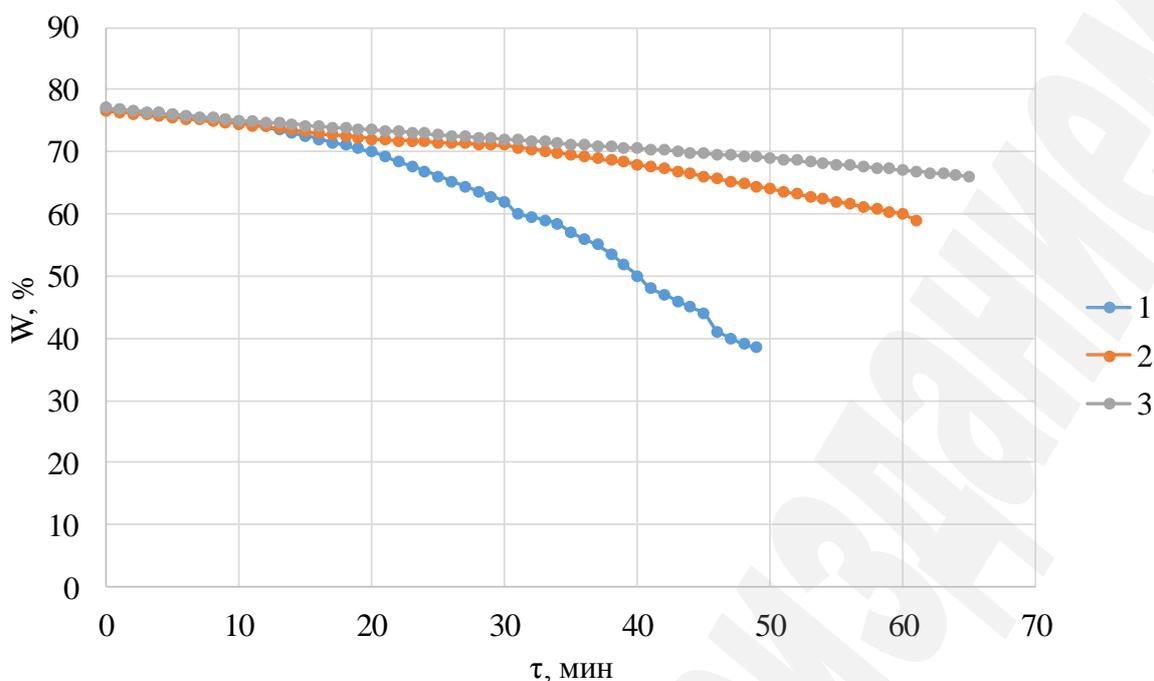
**Рис. 5.** Линии изменения влажности при удельной мощности: 1 – 2,5 кВт/м<sup>2</sup>; 2 – 5 кВт/м<sup>2</sup>; 3 – 7,5 кВт/м<sup>2</sup>; 4 – 10 кВт/м<sup>2</sup>

Увеличение подводимой к продукту мощности в 4 раза уменьшает продолжительность сушки в 2,5 раза (рис. 5).

Важным параметром процесса сушки является толщина слоя продукта, которая связана с удельной загрузкой продукта в сушилке. Инфракрасное излучение способно проникать в продукт на определенную глубину, в то же время влага должна переходить в окружающую среду и из нижних слоев сырья.

В данной серии опытов при постоянной удельной мощности излучателей изменялись значения удельной нагрузки продукта (рис. 6).

Разница температур продукта при всех нагрузках не превышает 10 °С, однако чем больше толщина слоя, тем ниже интенсивность влагоудаления (рис. 6).

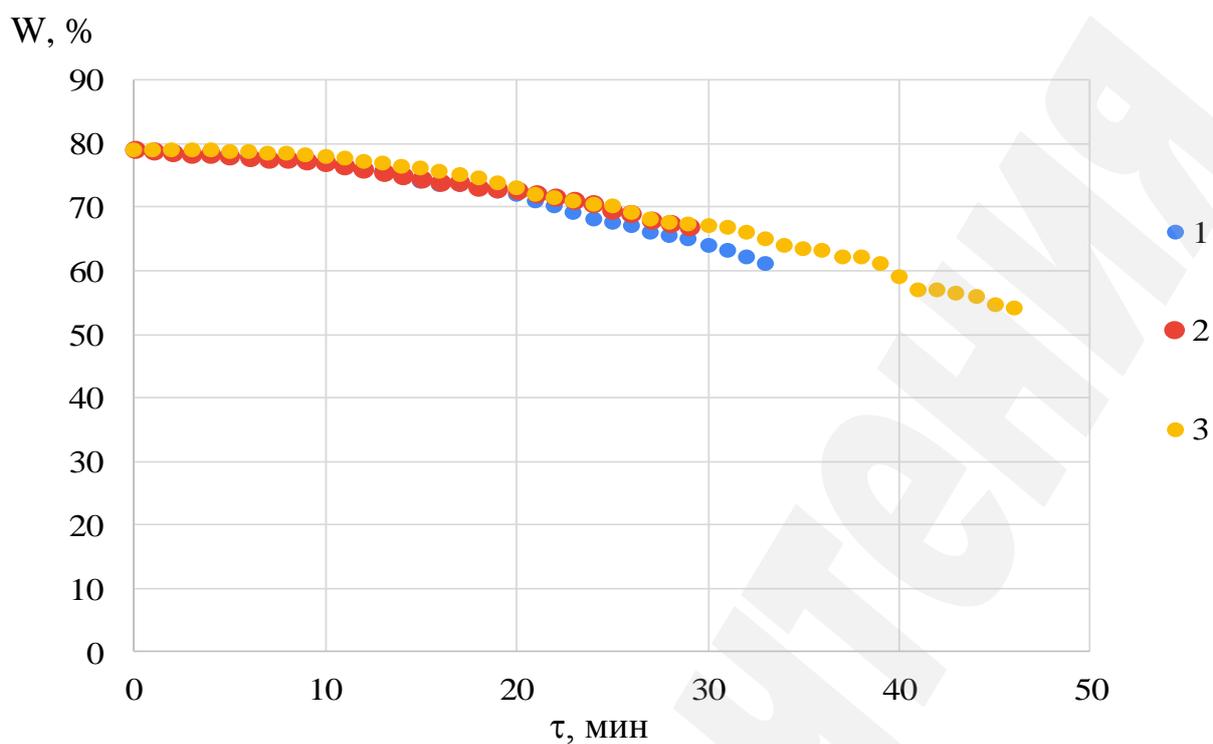


**Рис. 6.** Линии изменения влажности при удельной нагрузке: 1 – 2,5 кг/м<sup>2</sup>; 2 – 5 кг/м<sup>2</sup>; 3 – 7,5 кг/м<sup>2</sup>

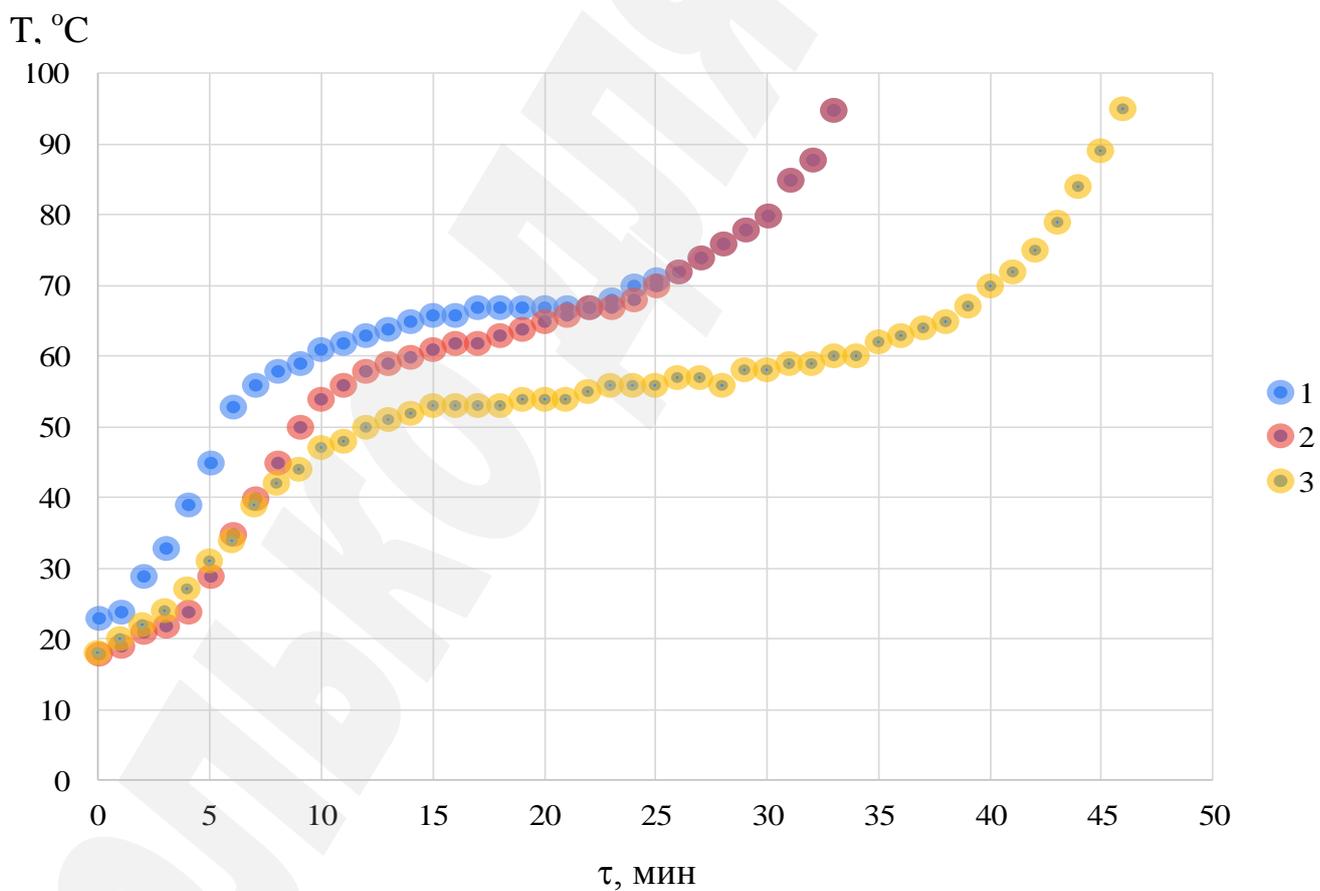
Удельная нагрузка существенно влияет на скорость сушки (рис. 6). С одной стороны, увеличение толщины слоя увеличивает производительность установки. С другой стороны, уменьшается скорость процесса вследствие меньшего проникновения ИК-излучения в продукт, а также сопротивления переносу влаги к диффузионной среде, который создают верхние слои шлама. Уменьшение толщины слоя шлама в 2 раза ведет к увеличению скорости сушки в 2–3 раза. Увеличение толщины слоя также ведет к неравномерности нагрева и высушивания продукта. В то время, как температура в толще шлама не превышает 70 °С, поверхность разогревается до 150 °С и выше.

Чем ближе расположено сырье к излучателю, тем меньше энергии рассеивается и больше передается продукту. В то же время при близком расположении шлама к излучателям может возникнуть неравномерность нагрева. Опыт проводился при удельной нагрузке 2,5 кг/м<sup>2</sup>, подводимая мощность составляла 7,5 кВт/м<sup>2</sup>. Изменялось расстояние от слоя продукта до излучателя (рис. 7).

Изменение расстояния продукта от излучателя в исследованных пределах не оказывает существенного влияния на скорость удаления влаги из шлама (рис. 8). Разница влажности между опытами в течение всего процесса не превышает 5 %. На расстояниях 10 и 13 см разница составляет менее 1 %, то есть скорости сушки практически одинаковы.



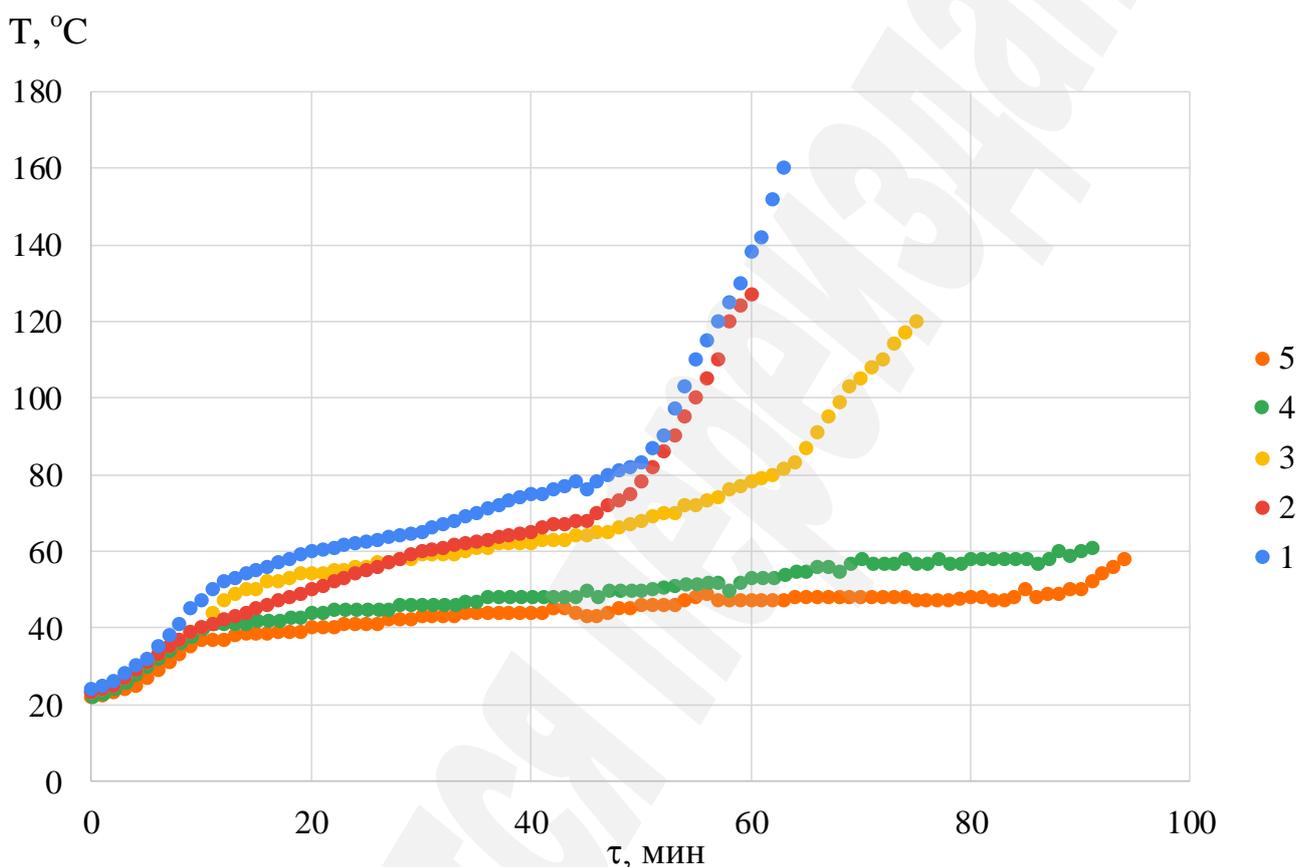
**Рис. 7.** Линии изменения влажности при расстоянии до излучателей:  
1 – 7 см; 2 – 10 см; 3 – 13 см



**Рис. 8.** Термограммы процесса сушки при расстоянии до излучателей:  
1 – 7 см; 2 – 10 см; 3 – 13 см

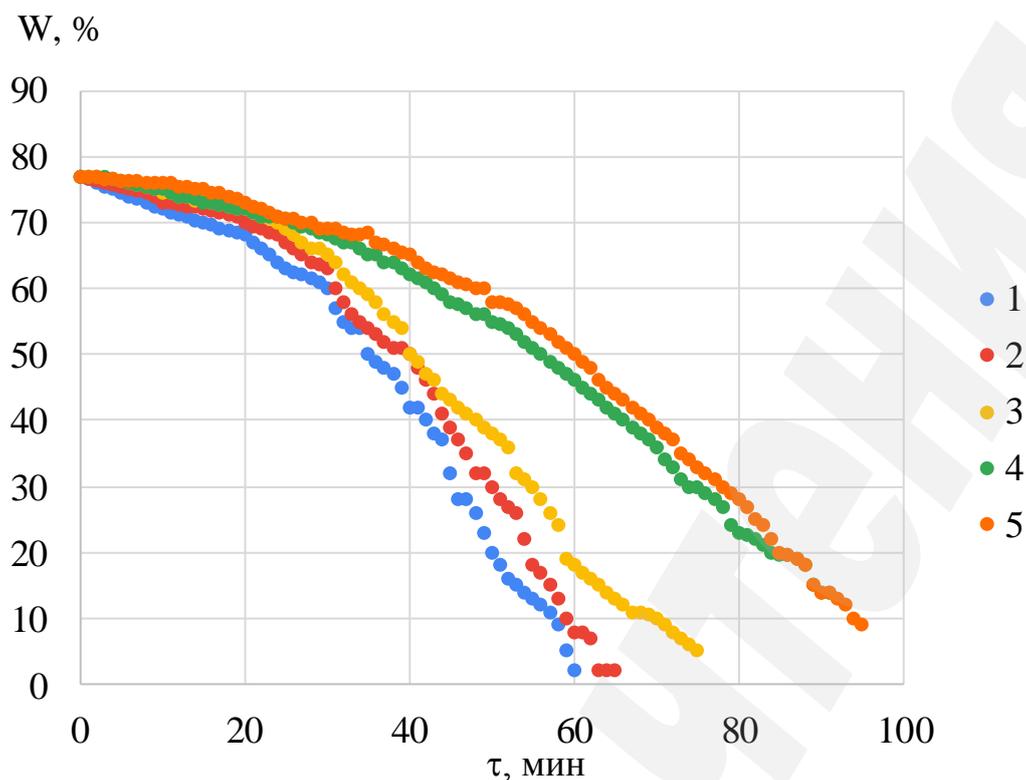
С другой стороны, уменьшение расстояния ведет к значительному повышению температуры шлама (рис. 8). В таких условиях возникает угроза термического повреждения верхнего слоя сырья, которая приводит к ухудшению качества конечного продукта. При этом, нижние слои продукта не досушиваются.

Определено влияние скорости движения воздуха в камере. опыты проводились при удельной загрузке  $2,5 \text{ кг/м}^2$  и подводе  $5 \text{ кВт/м}^2$  мощности на расстоянии  $0,13 \text{ м}$  от излучателей. Скорость воздуха изменялась от  $0$  до  $2,5 \text{ м/с}$  (рис. 9, 10).



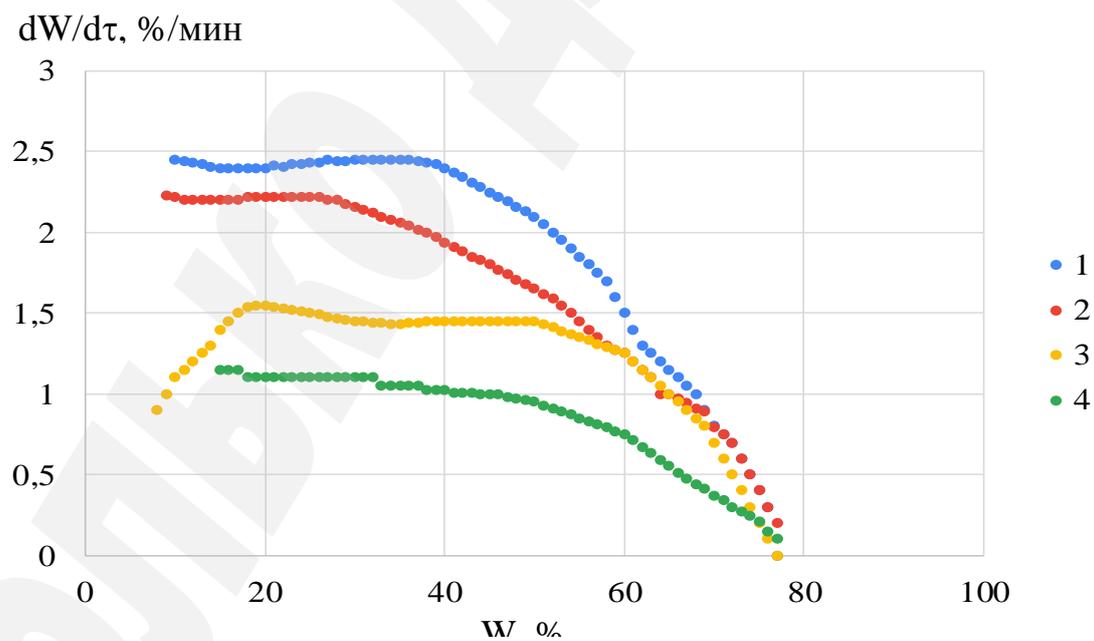
**Рис. 9.** Термограммы процесса сушки: 1 –  $0 \text{ м/с}$ ; 2 –  $0,5 \text{ м/с}$ ; 3 –  $1 \text{ м/с}$ ; 4 –  $2 \text{ м/с}$ ; 5 –  $2,5 \text{ м/с}$

Принудительная вентиляция сушильной камеры с одной стороны снижает диффузионное сопротивление пограничного слоя, уменьшает концентрацию влаги в воздухе и, таким образом, увеличивает интенсивность переноса влаги из сырья в диффузионную среду. С другой стороны, с воздухом возникают потери тепловой энергии, что наоборот уменьшает скорость и энергоэффективность процесса сушки. С увеличением скорости воздуха в камере уменьшается температура продукта (рис. 10), что указывает на увеличение потерь энергии с уходящим воздухом.



**Рис. 10.** Линии изменения влажности при скорости воздуха в камере: 1 – 0 м/с; 2 – 0,5 м/с; 3 – 1 м/с; 4 – 2 м/с; 5 – 2,5 м/с

При значениях скоростей воздуха больших, чем 0,5 м/с, наблюдается уменьшение скорости сушки (рис. 11), поскольку увеличивается влагосодержание диффузионной среды над продуктом и уменьшается движущая сила процесса.



**Рис. 11.** Линии скорости процесса сушки при скорости воздуха в камере: 1 – 0 м/с; 2 – 0,5 м/с; 3 – 1 м/с; 4 – 2 м/с

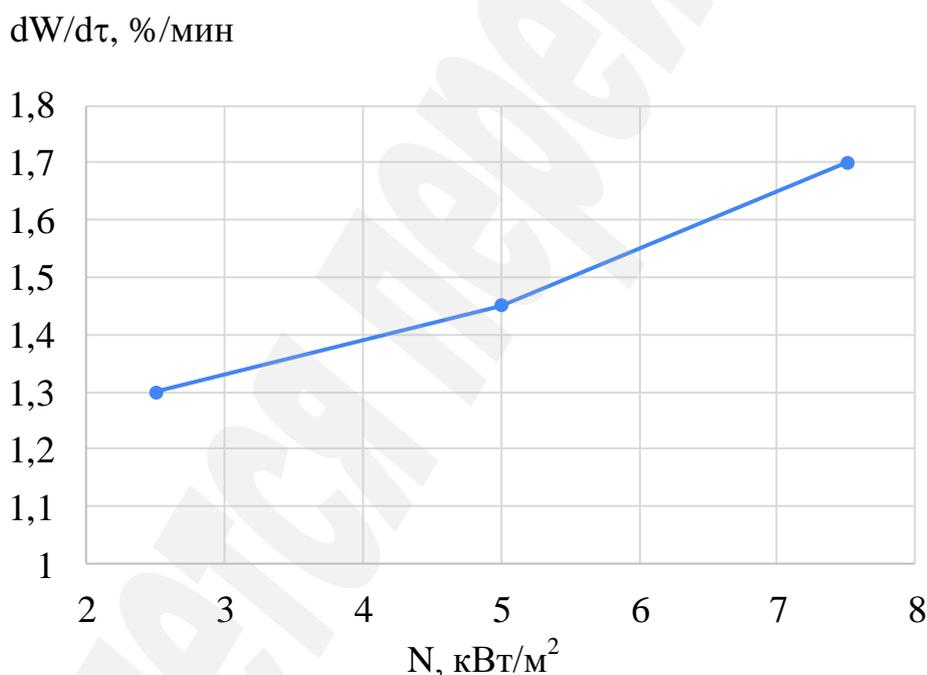
Таким образом, значения расхода воздуха в сушильной камере рекомендуется поддерживать на уровне, который соответствует 0,5 м/с.

## 6.2. Исследования кинетики инфракрасной сушки кофейного шлама в движущемся слое

Серии опытов по этой задаче проводились на стенде (рис. 3). Направлением исследований было установить влияние характерных для подвижного слоя факторов на эффективность обезвоживания.

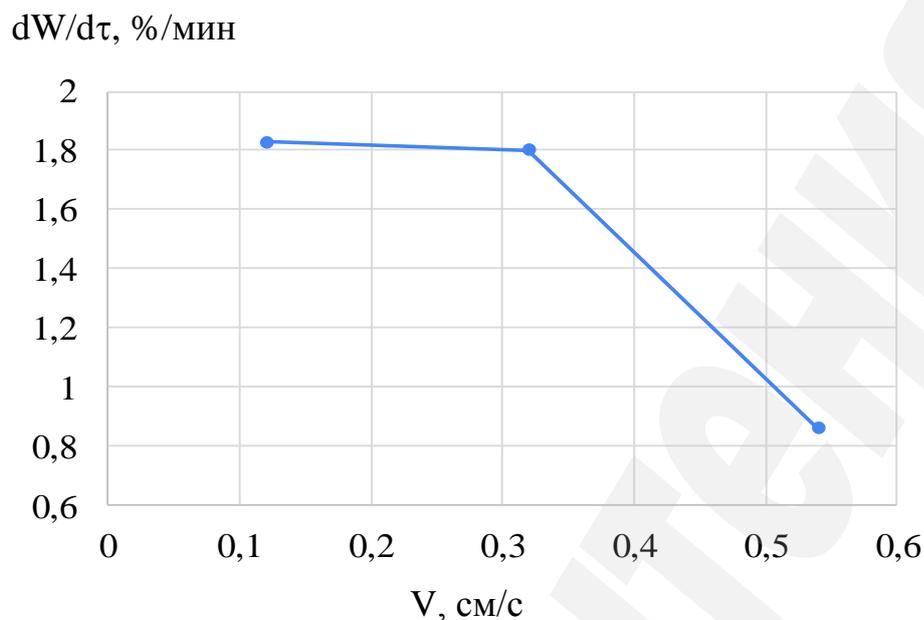
Определено влияние мощности на среднюю скорость процесса сушки. Опыты проводились при скорости движения ленты транспортера 0,13 см/с, удельной нагрузке 3 кг/м<sup>2</sup>. Функционировал один ИК-модуль. Количество удаленной влаги определялось по начальной и конечной влажности шлама по методике высушивания до постоянной массы. Скорость сушки рассчитывалась по количеству удаленной влаги и времени, на протяжении которого на шлам действовало ИК-излучение (рис. 12).

При увеличении количества подводимой энергии в три раза, скорость удаления влаги растет на 30 % (рис. 12). В среднем скорость сушки составляет 1,3–1,7 %/мин.



**Рис. 12.** Влияние удельной мощности инфракрасного излучения на скорость сушки кофейного шлама

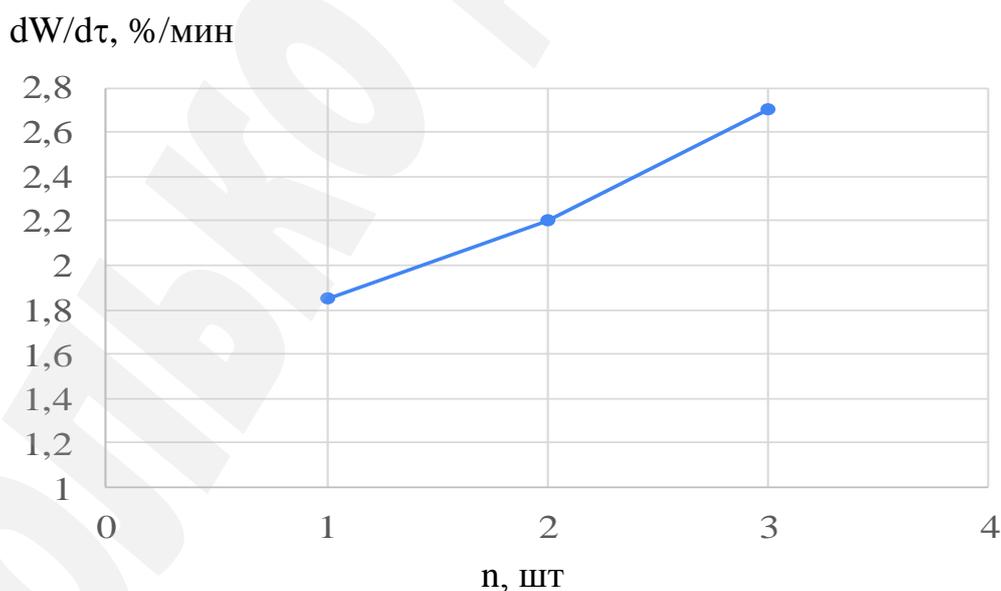
Определено влияние скорости движения ленты на интенсивность ИК сушки. Скорость движения ленты связана с продолжительностью пребывания шлама под действием ИК-излучения. Опыты проводились при удельной нагрузке 2,5 кг/м<sup>2</sup>, удельная мощность одного работающего ИК-модуля составляла 5 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 13).



**Рис. 13.** Влияние скорости движения ленты на интенсивность удаления влаги

На минимальной скорости продукт нагревается более интенсивно, термическое повреждение верхнего слоя вследствие длительного воздействия ИК-излучения не наблюдалось. Производительность установки в режиме загрузки  $3 \text{ кг/м}^2$  при скорости  $0,33 \text{ см/с}$  составила  $1,5 \text{ кг/ч}$  сухого шлама влажностью  $10 \%$ .

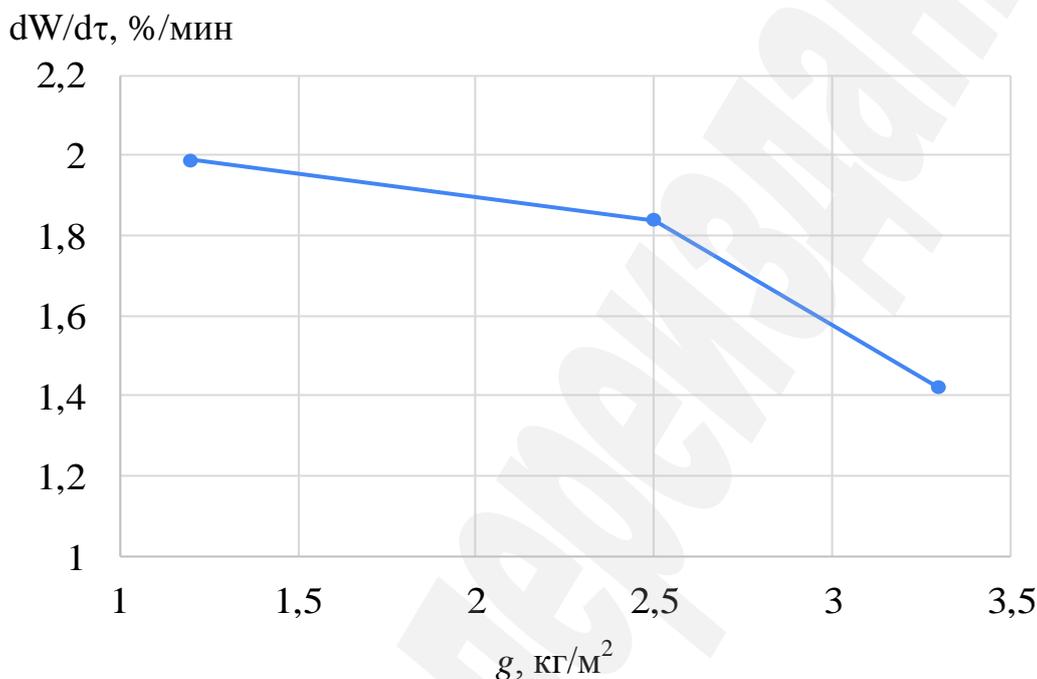
Определено влияние количества инфракрасных модулей. Увеличение количества ИК-модулей приводит к повышению продолжительности пребывания продукта под действием излучения. Это позволяет использовать более высокие скорости движения продукта и повысить производительность установки. Скорость движения ленты транспортера составляла  $0,33 \text{ см/с}$ , загрузка продукта  $2,5 \text{ кг/м}^2$ , а подведенная удельная мощность поддерживалась на уровне  $5 \text{ кВт/м}^2$  (рис. 14).



**Рис. 14.** Влияние количества инфракрасных модулей на скорость удаления влаги

С увеличением количества модулей от 1 до 3 скорость сушки увеличивалась в 1,5 раза (рис. 14).

Определено влияние удельной нагрузки. Удельная нагрузка определяется толщиной слоя продукта. Опыты проводились при значениях удельной нагрузки 1,2–3,3 кг/м<sup>2</sup>, скорости движения продукта 0,13 см/с, при подводе 5 кВт/м<sup>2</sup> энергии от ИК-генераторов (рис. 15).



**Рис. 15.** Влияние удельной нагрузки на скорость удаления влаги

Резкое снижение скорости удаления влаги при нагрузке большей, чем 2,5 кг/м<sup>2</sup>, подтверждает то, что ИК-излучение проникает в продукт на определенную глубину. При большей толщине слоя энергия действует не на всю массу продукта на ленте, что приводит к снижению интенсивности процесса сушки, а верхние слои продукта создают сопротивление переносу влаги из нижних слоев в диффузионную среду.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Исследованный способ сушки обладает низкими энергозатратами (3,2 МДж/кг) по сравнению с конвективными сушилками (5–9 МДж/кг). Применение ИК сушки позволит сохранить ценные полифенолы в кофейном шламе, стабилизировать его, не влияя на биоактивные свойства. Применение ленточной ИК сушки позволит увеличить производительность, реализовать процесс в промышленном масштабе.

*Weaknesses.* Сложно конкурировать по производительности с конвективными сушилками.

*Opportunities.* При внедрении ИК сушилки для кофейного шлама, предприятие получит новую энергоэффективную технологию переработки отходов. Это позволит снизить нагрузку на литосферу.

*Threats.* Для реализации процесса ИК сушки необходимо специфическое оборудование.

## 8. Выводы

1. Определено влияние режимных параметров (интенсивности энергетического подвода, температуры, скорости потока воздуха, толщины слоя продукта и удельной нагрузки) на кинетику периодической ИК сушки кофейного шлама. Увеличение подводимой к продукту мощности в 4 раза уменьшает продолжительность сушки в 2,5 раза (рис. 5). Уменьшение толщины слоя шлама в 2 раза ведет к увеличению скорости сушки в 2–3 раза. Увеличение толщины слоя также ведет к неравномерности нагрева и высушивания продукта. В то время, как температура в толще шлама не превышает 70 °С, поверхность разогревается до 150 °С и выше. Изменение расстояния продукта от излучателя в исследованных пределах не оказывает существенного влияния на скорость удаления влаги из шлама (рис. 8). С увеличением скорости воздуха в камере уменьшается температура продукта (рис. 10), что указывает на увеличение потерь энергии с уходящим воздухом. При значениях скоростей воздуха больших, чем 0,5 м/с, наблюдается уменьшение скорости сушки (рис. 11).

2. Определено влияние режимных параметров (интенсивности энергетического подвода, удельной нагрузки, скорости ленты, количества ИК модулей) на кинетику непрерывной ИК сушки кофейного шлама. На минимальной скорости продукт нагревается более интенсивно, термическое повреждение верхнего слоя вследствие длительного воздействия ИК-излучения не наблюдалось. С увеличением количества модулей от 1 до 3 скорость сушки увеличивалась в 1,5 раза (рис. 14). Резкое снижение скорости удаления влаги при нагрузке большей, чем 2,5 кг/м<sup>2</sup>, подтверждает то, что ИК-излучение проникает в продукт на определенную глубину.

## References

1. Burdo, O. G. (2007). *Evolyutsiya sushil'nykh ustanovok*. Odessa, 368.
2. Rudobashta, S. P. (1980). *Massoperenos v sistemah s tverdoy fazoy*. Moskva, 248.
3. Kathiravan Krishnamuthy, Harpreet Kaur Khurana, Soojin Jun, J. Irudayaraj, Ali Demirci (2008). Infrared Heating in Food Processing: An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7, 2–13. DOI: [10.1111/j.1541-4337.2007.00024.x](https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00024.x)
4. Sandu, C. (1986). Infrared radiatedrying in food engineering: a process analysis. *Biotechnol. Prog.*, 2 (3), 109–119. <https://doi.org/10.1002/btpr.5420020305>
5. Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., Kumar, G., Saratale, G. D., Aslam, M., Khan, H. A., ... Mahmoud, E. (2019). Valorization of spent coffee grounds into biofuels and value-added products: Pathway towards integrated bio-refinery. *Fuel*, 254, 115640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115640>

6. Sabarez, H. (2016). *Drying of Food Materials*. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03416-8>

7. Onwude, D.I., Hashim, N., Janius, R.B., Nawi, N.M., Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 15 (3), 599–618 <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>

8. Saavedra, J., et al. (2017). Industrial avocado waste: Functional compounds preservation by convective drying process. *J. Food Eng.*, 198, 81–90 DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2016.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.018)

9. Gómez-de la Cruz, F. J., Cruz-Peragón, F., Casanova-Peláez, P. J., Palomar-Carnicero, J. M. (2015). A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics. *Fuel Processing Technology*, 130, 188–196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.012>

10. Potapov, V. A. (2015). Fil'tracionnaya sushka pri povyshennom davlenii. *Naukovi praci ONAHT*, 47 (2), 134–137.

11. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Zykov, A., Yarovy, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (11(101)), 2019. DOI: [10.15587/1729-4061.2019.178937](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937)

12. Prommuak, C., Tharangkool, N., Pavasant, P., Ponpesh, P., Jarunlumert, T. (2020). Computational fluid dynamic design of spent coffee ground cabinet dryer using recycled heat from air compressor. *Chemical Engineering Research and Design*, 153, 75–84. doi: [10.1016/j.cherd.2019.10.017](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.017)

13. Burdo, O. G., Terziev, S. G., Ruzhickaya, N. V., Makievskaya, T. L. (2014). *Processy pererabotki kofejnogo shlama*. Kiev: EnterPrint, 228.

14. Fu, B. A., Chen, M. Q. (2019). Microwave drying performance of spent coffee grounds briquette coupled with mineral additives. *Drying Technology*, 1–8. doi: [10.1080/07373937.2019.1692862](https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1692862)

15. Osorio-Arias, J., Delgado-Arias, S., Cano, L., Zapata, S., Quintero, M., Nuñez, H., ... Vega-Castro, O. (2019). Sustainable Management and Valorization of Spent Coffee Grounds Through the Optimization of Thin Layer Hot Air-Drying Process. *Waste and Biomass Valorization*. doi: [10.1007/s12649-019-00793-9](https://doi.org/10.1007/s12649-019-00793-9)

16. Chen, N. N., Chen, M. Q., Fu, B. A., Song, J. J. (2017). Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy*, 121, 726–738. doi: [10.1016/j.energy.2017.01.054](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.054)

*The object of research is drying of spent coffee grounds. In modern production, the issues of rational use of energy in all processes of food technology, including drying, are urgently raised. In many food technologies, 2–3 times more energy is used than is physically necessary for the process. This determines the energy intensity of production and the quality of products. Drying processes are among the most energy-intensive, and in many cases the proportion of energy in the cost of production is up to 30 %. When drying of spent coffee grounds, convective dryers are mainly used, the energy consumption of which is 5 MJ/kg of removed moisture and above. Convective drying uses 40 % of the supplied energy to evaporate moisture.*

*Also, a significant drawback of convective dryers is the discharge of waste coolant into the atmosphere, which has a heat content of only 10–15 % less than the hot air supplied to the drying chamber. The paper proposes the use of infrared radiation for drying of spent coffee grounds in periodic and continuous units. This will allow in the future to reduce specific energy consumption. During the study, the influence of the energy supply intensity, temperature, air flow rate, product layer thickness and specific load on the kinetics of periodic infrared drying of spent coffee grounds is determined. The influence of the energy supply intensity, specific load, tape speed, and the number of infrared modules on the kinetics of continuous infrared drying of spent coffee grounds is determined. The results are compared with convective drying in terms of specific energy consumption. A feature of the use of infrared radiation is its high efficiency and high rate of moisture removal from the surface layers of spent coffee grounds, and as a result, an increase in the productivity of the drying method and a decrease in specific energy consumption. The specific energy consumption obtained during operation of infrared drying of spent coffee grounds is 3.2 MJ/kg. This is below existing convection dryers.*

**Keywords:** *infrared drying, spent coffee grounds, drying kinetics, periodic and continuous units, specific energy consumption.*