

*М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА БУМАЖНОЙ МАССЫ НА СЕТКЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

*M. S. Revunov, E. N. Salmov*

### SIMULATION OF THE SURFACE OF A PAPER FLOW

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** При работе на длинносеточных бумагоделательных машинах (БДМ) остро стоит вопрос стабилизации параметров (в частности, угла падения и скорости напуска) потока бумажной массы, идущей из напорного или напускного устройства. Применение контактных методов измерения скорости невозможно, так как прибор нарушает целостность потока и, соответственно, разрушает сам процесс формирования бумажного полотна на сетке. Применение лазерных измерителей затрудняется конструктивными особенностями сеточного стола. Таким образом, на первый план выходят оптические измерители скорости потока жидкости на базе кросскорреляционного алгоритма. Однако обосновать применимость данного метода на действующей БДМ невозможно без ряда сложных, ресурсоемких экспериментов. Целью работы является создание модели поверхности потока бумажной массы на сетке БДМ и оценка с ее помощью основных характеристик бесконтактного метода измерения скорости на базе кросскорреляционного алгоритма. **Материалы и методы.** В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, методы цифровой обработки изображений и трассерной визуализации, компьютерное моделирование. **Результаты.** Создана модель поверхности потока бумажной массы на сеточной части БДМ. **Выводы.** Оценка основных характеристик бесконтактного способа измерения скорости на базе кросскорреляционного алгоритма с помощью модели поверхности потока бумажной массы позволяет говорить о применимости метода для вышеуказанных целей.

**A b s t r a c t. Background.** On long-mesh papermaking machines (BDM), the issue of stabilization of the parameters (in particular, the angle of incidence and the rate of discharge) of the flow of paper mass coming from the pressure or discharge device is acute. The use of contact methods of speed measurement is impossible, since the device violates the integrity of the flow and, accordingly, destroys the process of forming a paper web on the grid. The use of laser meters is complicated by the design features of the grid table. Thus, optical liquid flow velocity meters based on a cross-correlation algorithm come to the fore. However, it is impossible to justify the applicability of this method on the current BDM without a number of complex, resource-intensive experiments. The purpose of this work is to create a model of the paper mass flow surface on the BDM grid and to evaluate the main characteristics of the non-contact speed measurement method based on the cross-correlation algorithm. **Materials and methods.** The paper uses methods of modern theory of automatic control and automation of technological processes, methods of digital image processing and tracer visualization, computer modeling. **Results.** A model of the paper mass flow surface on the grid part of the BDM was created. **Conclusions.** Evaluation of the main characteristics of the non-contact method of speed measurement based on the cross-correlation algorithm using the paper mass flow surface model allows us to talk about the applicability of the method for the above purposes.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** бумагоделательные машины, бесконтактный способ измерения скорости, кросскорреляционный алгоритм.

**К e y w o r d s:** papermaking machines, contactless speed measurement, cross-correlation algorithm.

### *Постановка задачи*

Вес  $1 \text{ м}^2$  бумаги (картона) является одним из основных показателей качества продукции [1, 2]. Среди множества взаимосвязанных факторов, влияющих на дисперсию веса бумаги или картона, в первую очередь выделяют угол и скорость напуска массы на сеточную часть бумагоделательной машины (БДМ) [3]. Таким образом, для стабилизации веса  $1 \text{ м}^2$  бумаги (картона) необходимо ввести дополнительные контуры регулирования [4], оснащенные бесконтактными оптическими измерителями скорости потоков жидкости [5]. Наиболее перспективным методом бесконтактного измерения скорости потока жидкости, который может быть применен на длинносеточных БДМ, является кросскорреляционный алгоритм [5, 6]. Однако оценить характеристики кросскорреляционного измерителя скорости на действующей БДМ проблематично, так как эксперименты приводят к нарушению технологического процесса. Поэтому и необходимо разработать модель поверхности потока бумажной массы на сетке БДМ.

На рис. 1 приведены фотографии процесса напуска бумажной массы на сетку бумагоделательной машины.

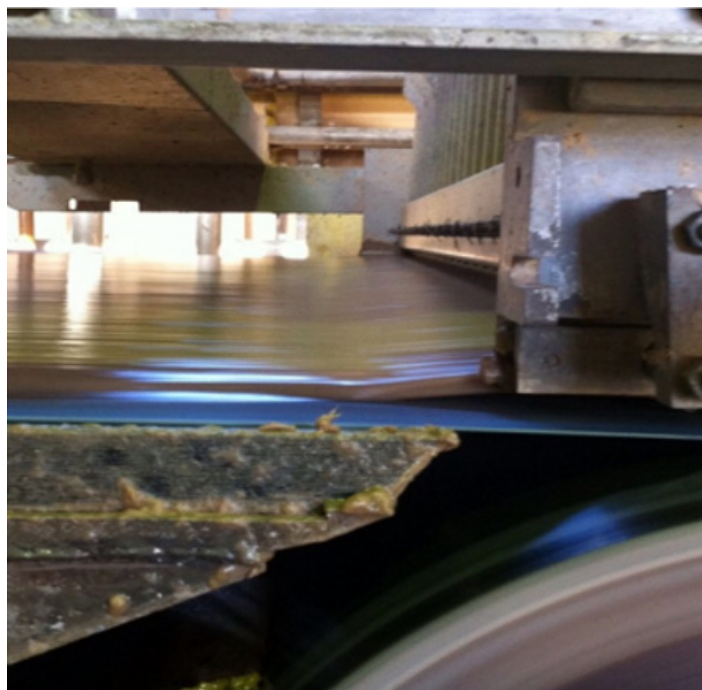


Рис. 1. Процесс напуска массы (вид сбоку)

### *Моделирование поверхности потока бумажной массы*

Моделирование поверхности потока бумажной массы на «мокрой части» БДМ будем проводить в соответствии со следующим алгоритмом:

- видеозапись процесса напуска массы на сетку БДМ, кадрирование видео;
- формирование расчетных областей, поиск координат максимума кросскорреляционной функции, расчет скорости и направления движения потока жидкости [7, 8];
- формирование данных об изменении яркости набора пикселей (каждой точки потока) во времени на основании информации о скорости и направлении движения потока жидкости (рис. 2);

- выделение низкочастотной (при наличии) и высокочастотной составляющих сигнала с помощью метода SVD-разложения;
- моделирование низкочастотной и высокочастотной составляющих сигнала.

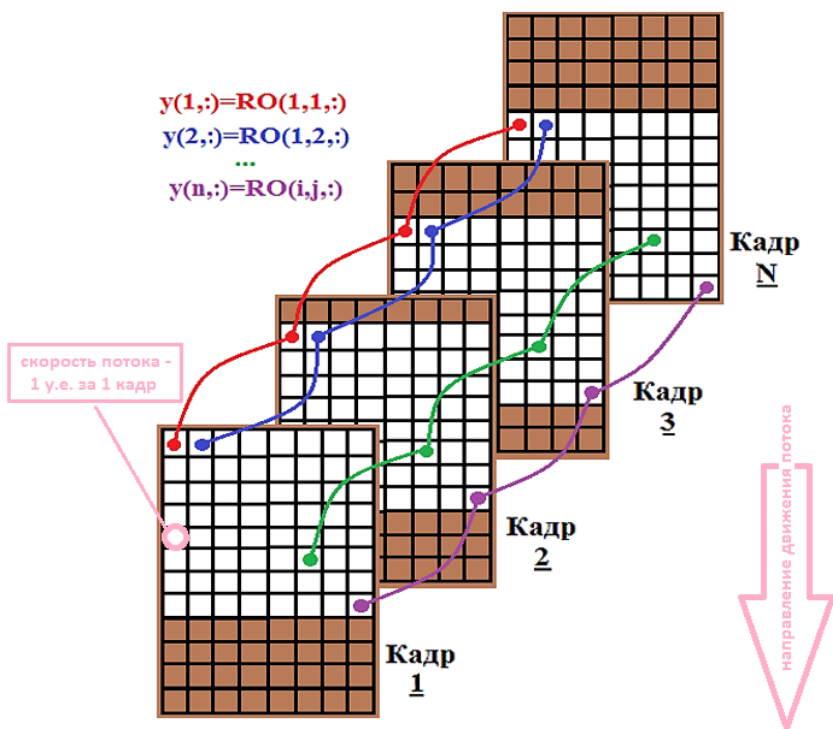


Рис. 2. Принцип формирования данных об яркости пикселей

Большинство этапов алгоритма подробно рассмотрено в работах [8–10], поэтому остановимся на шагах выделения и моделирования низкочастотной и высокочастотной составляющих. Пример изменения яркости пикселя движущихся точек представлен на рис. 3.

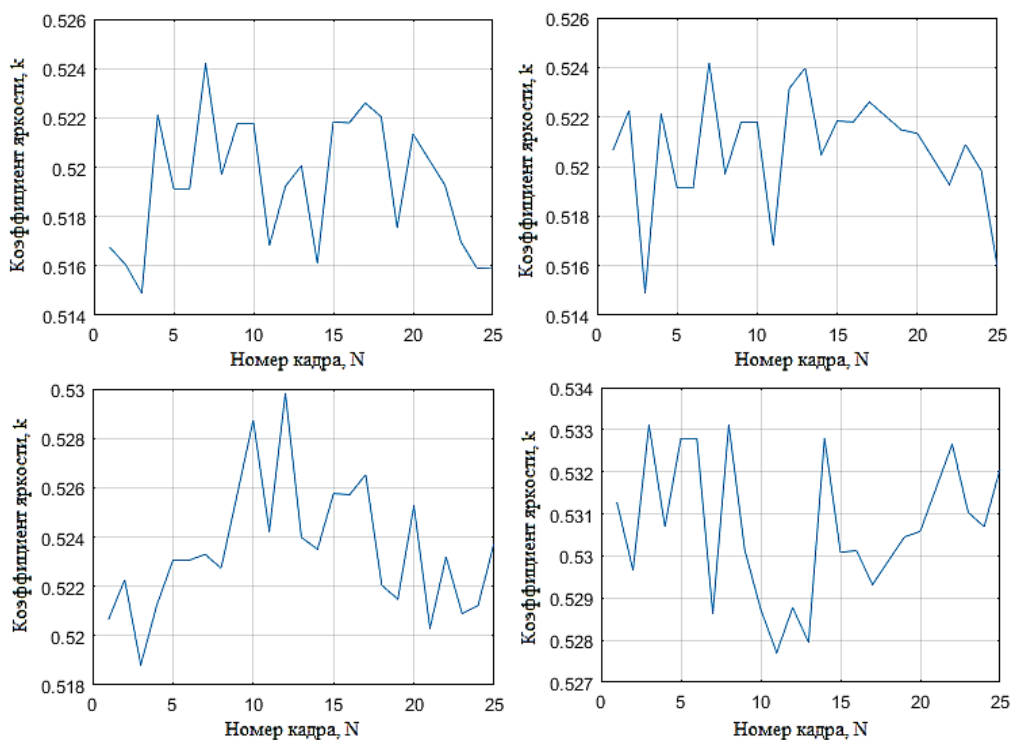


Рис. 3. Примеры изменения яркости пикселя четырех движущихся точек на отслеживаемой области

Выделим низкочастотную и высокочастотную составляющие сигналов с помощью метода SVD-разложения. Алгоритм состоит из четырех шагов: вложение, сингулярное разложение, диагональное усреднение и группировка. Первые два шага в совокупности называются разложением, последние – восстановлением.

На рис. 4 в качестве примера представлены собственные векторы для данных об изменении яркости пикселя с индексом RO (42,36,:), а на рис. 5 – результирующая высокочастотная составляющая (так как сигнал не имеет тренда). В ходе обработки данных была выделена и удалена периодическая составляющая сигнала, обусловленная пульсацией света осветительных приборов.

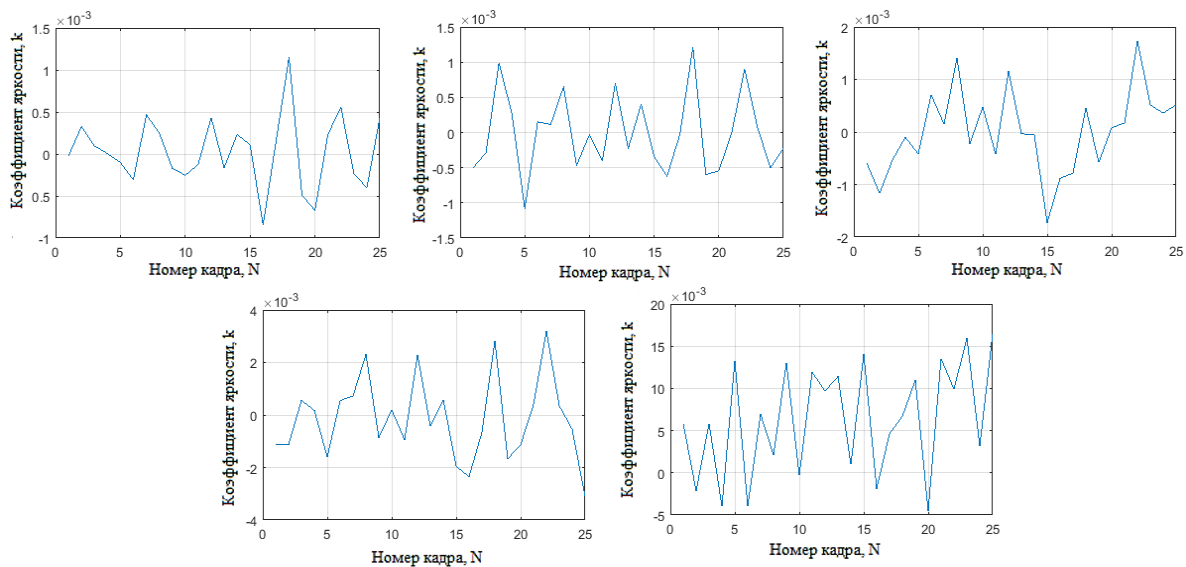


Рис. 4. Собственные векторы для данных об изменении яркости пикселя с индексом RO (42,36,:)

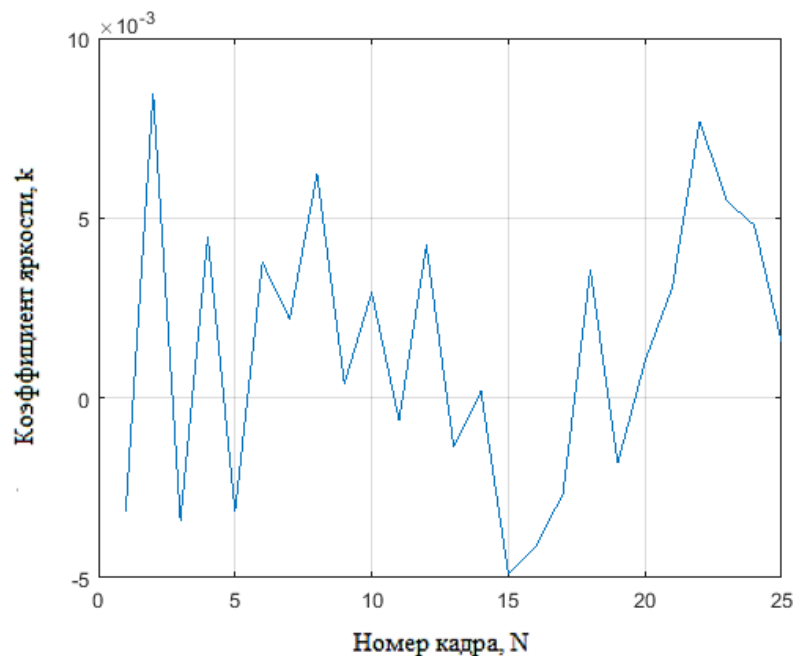


Рис. 5. Пример высокочастотной составляющей сигнала

Моделирование высокочастотной составляющей предлагается осуществить с помощью метода формирующих фильтров [11, 12]. Пример результата работы метода представлен на рис. 6.

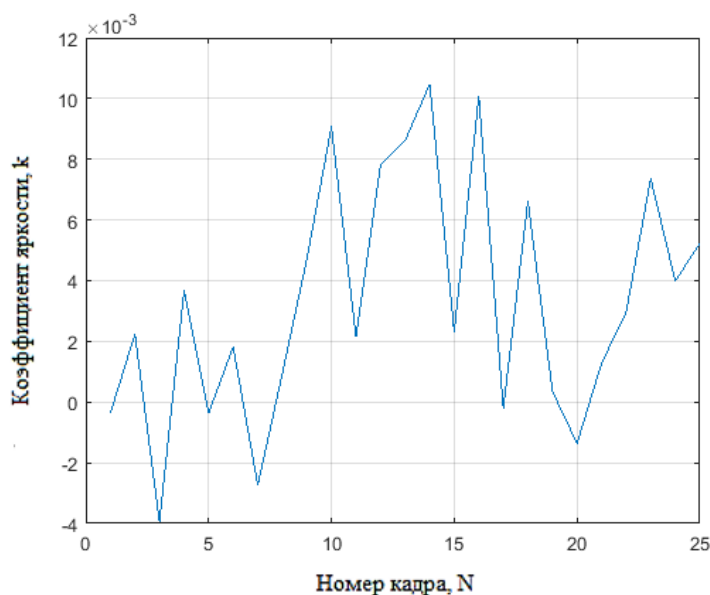
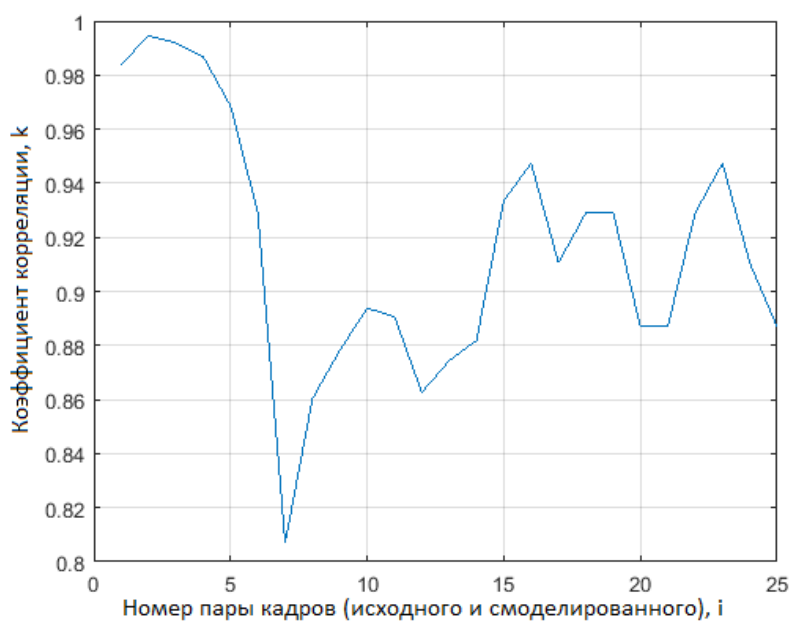


Рис. 6. Пример смоделированной высокочастотной составляющей

Применение метода формирующих фильтров позволяет сформировать новый сигнал изменения яркости каждого пикселя изображения на всех кадрах, т.е., другими словами, позволяет получить полную модель поверхности бумажной массы на сеточной части БДМ. Это необходимо для того, чтобы оценить диапазон измерения скорости напуска бумажной массы на сетку с помощью кросскорреляционного алгоритма и другие наиболее важные параметры, не прибегая к проведению экспериментов на реальном оборудовании.

Для подтверждения корректности модели поверхности бумажной массы на сеточной части БДМ был проведен ранговый тест Вилкоксона на равенство медиан двух независимых выборок. По завершении теста была принята нулевая гипотеза, состоящая в том, что независимые выборки  $x_i$  (исходные выборки) и  $y_i$  (смоделированные выборки) взяты из генеральных совокупностей с равными медианами.

Кроме того, была проведена оценка коэффициента корреляции между исходными и смоделированными кадрами, позволяющая проанализировать статистическую взаимосвязь между ними (рис. 7).

Рис. 7. График изменения коэффициента корреляции  $k$

Примеры изображений поверхности бумажной массы, полученных с помощью модели, представлены на рис. 8.

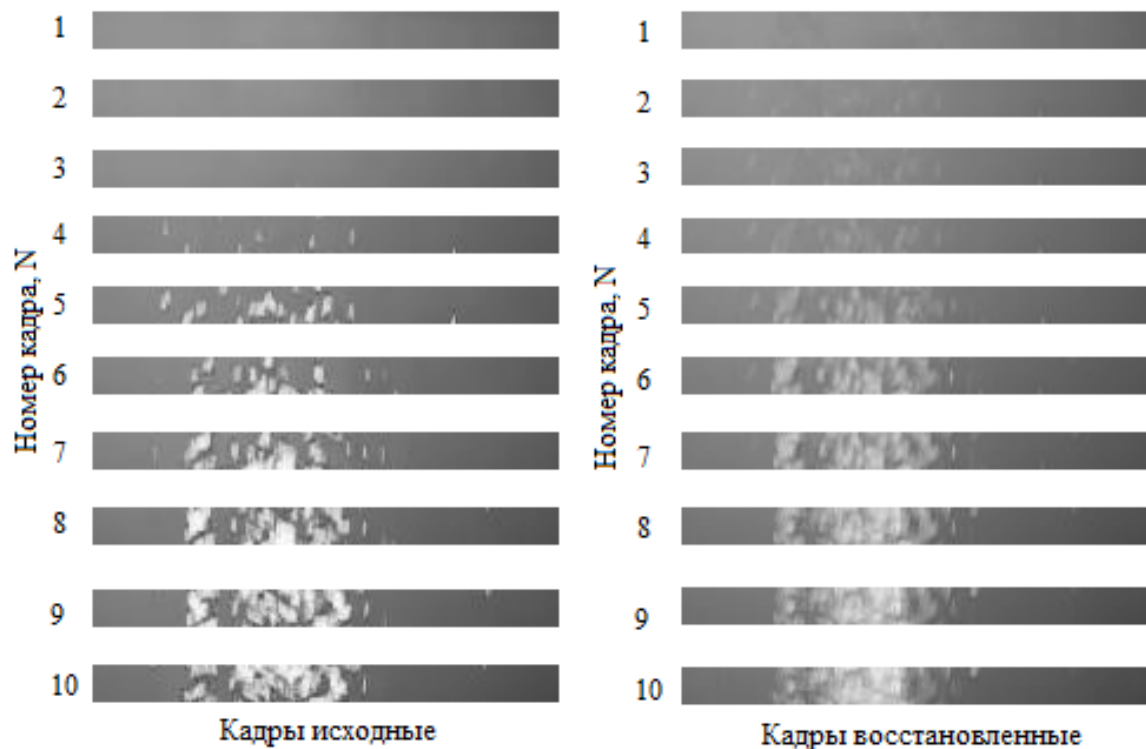


Рис. 8. Примеры изображений поверхности бумажной массы

### Синтез изображения потока бумажной массы

Модель поверхности бумажной массы, сформированная в предыдущем разделе, представляет из себя прямоугольные кадры. Результат расчета скорости потока бумажной массы по смоделированным кадрам представлен на рис. 9. Из рисунка видно, что значения скорости потока бумажной массы, полученные при оценке исходных и смоделированных кадров, совпадают, т.е. можно говорить о применимости моделей поверхности бумажного полотна на сеточной части БДМ при оценке основных параметров кросскорреляционного измерителя скорости. Сводные данные по бесконтактному оптическому измерителю скорости потока бумажной массы представлены в табл. 1.

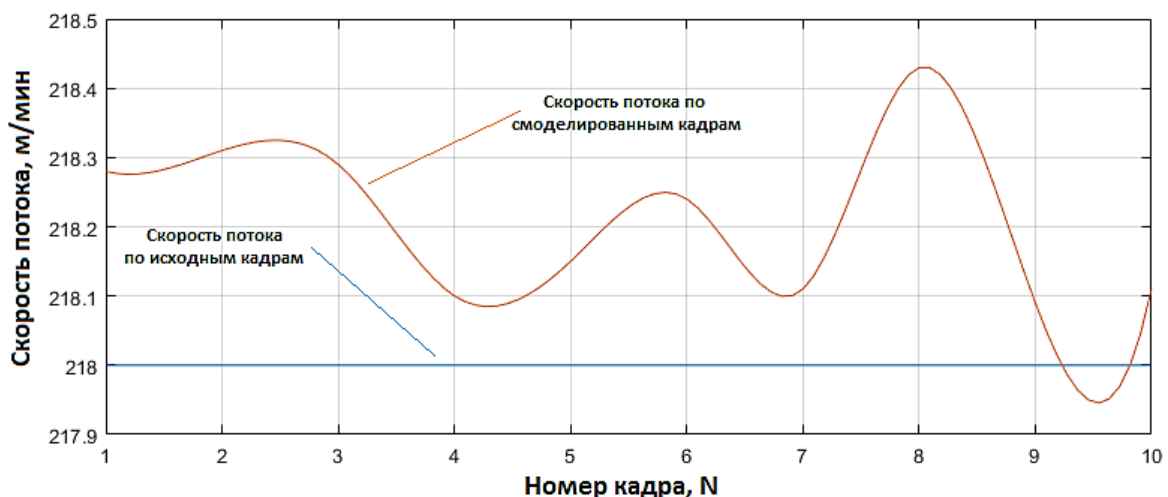


Рис. 9. Скорость потока бумажной массы по смоделированным кадрам

Таблица 1

Основные характеристики бесконтактного измерителя скорости на базе модифицированного кросскорреляционного алгоритма и камеры Canon EOS 600D, полученные при обработке моделей потока бумажной массы с разной скоростью истечения

Показатель	Реальное значение	Требуемое значение
Диапазон измерений	$\approx 0,1 - 20$ м/с	$\approx 0,5 - 15$ м/с*
Погрешность измерений	$\approx 0,25$ %	$\approx 0,35$ %**
Быстродействие вычислений	$\approx 240$ измерений в 1 с	$\approx 240$ измерений в 1 с***

Примечания. \* скорость на реальных длинносеточных БДМ варьируется в диапазоне от 120 до 900 м/мин; \*\* погрешность измерения будет оцениваться по наименее точному устройству в системе – энкодеру; \*\*\* быстродействие вычислений напрямую зависит от кадровой частоты камеры и при необходимости может быть увеличено за счет использования другого оборудования.

### Библиографический список

1. Фляте, Д. М. Свойства бумаги : учеб. пособие / Д. М. Фляте. – Краснодар : Лань, 2012. – 384 с.
2. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Москва : Школа бумаги, 2006. – 697 с.
3. Зорин, И. Ф. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства / И. Ф. Зорин, В. П. Петров, С. А. Рогульская. – Москва : Лесная промышленность, 2008. – 272 с.
4. Ревунов, М. С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 24–31.
5. Котюк, А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. – Москва : Мир, 2007. – 48 с.
6. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник / П. П. Кремлевский ; под общ. ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2004. – Кн. 2. – 412 с.
7. Прэтт, У. Н. Цифровая обработка изображений / У. Н. Прэтт. – Москва : Мир, 2000. – 312 с.
8. Токарев, М. П. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости / М. П. Токарев, Д. М. Маркович, А. В. Бильский // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – Р. 109–131.
9. Ревунов, М. С. Повышение точности кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 30–37.
10. Артамонов, Д. В. Анализ спекловой картины для разработки алгоритма автоматической настройки оптических систем / Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов, А. В. Костюнин, И. В. Куприянов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 42–54.
11. Хемминг, Р. В. Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг. – Москва : Советское радио, 1980. – 112 с.
12. Солодовников, В. В. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / В. В. Солодовников. – Москва : Машиностроение, 2002. – 773 с.

### References

1. Flyate D. M. *Svoystva bumagi: ucheb. posobie* [Properties of paper: textbook. stipend]. Krasnodar: Lan', 2012, 384 p. [In Russian]
2. Ivanov S. N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Shkola bumagi, 2006, 697 p. [In Russian]
3. Zorin I. F., Petrov V. P., Rogul'skaya C. A. *Upravlenie protsessami tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Management of pulp and paper production processes]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 2008, 272 p. [In Russian]
4. Revunov M. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 24–31. [In Russian]
5. Kotyuk A. F. *Datchiki v sovremennykh izmereniyakh* [Sensors in modern measurements]. Moscow: Mir, 2007, 48 p. [In Russian]
6. Kremlevskiy P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv: spravochnik* [Flow meters and counters number of substances : reference]. 5th ed., rev. and suppl. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2004, bk. 2, 412 p. [In Russian]
7. Prett U. N. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow: Mir, 2000, 312 p. [In Russian]

8. Tokarev M. P., Markovich D. M., Bil'skiy A. V. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computing technology]. 2007, vol. 12, no. 3, pp. 109–131. [In Russian]
9. Revunov M. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2 (28), pp. 30–37. [In Russian]
10. Artamonov D. V., Semenov A. D., Kostyunin A. V., Kupriyanov I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2017, no. 2 (42), pp. 42–54. [In Russian]
11. Khemming R. V. *Tsifrovye fil'try* [Digital filter]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 112 p. [In Russian]
12. Solodovnikov V. V. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* [Technical cybernetics. The theory of automatic control]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 773 p. [In Russian]

**Ревунов Максим Сергеевич**

аспирант,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);  
 инженер отдела автоматизированных систем  
 управления технологическими процессами,  
 ОАО «Маяк»  
 (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)  
 E-mail: revunov\_rabota@mail.ru

**Revunov Maksim Sergeevich**

postgraduate student,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);  
 engineer of automated system  
 process control department,  
 JSC «Mayak»  
 (1 Bumaznikov street, Penza, Russia)

**Салмов Евгений Николаевич**

кандидат технических наук,  
 ведущий инженер-программист отдела  
 автоматизированной системы  
 управления технологическими процессами,  
 ОАО «Маяк»  
 (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)  
 E-mail: salmove@mail.ru

**Salmov Evgeniy Nikolaevich**

candidate of technical sciences,  
 leading software engineer of automated system  
 process control department,  
 JSC «Mayak»  
 (1 Bumaznikov street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Ревунов, М. С. Моделирование поверхности потока бумажной массы на сетке бумагоделательной машины / М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 43–50. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-6.