



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

ISSN 3033-7852

ТЕХНОЛОГИЯ и ЭНЕРГЕТИКА

№ 02 (02) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



«Глубокая интеграция образования и науки с индустрией — ключевое условие для обеспечения технологического суверенитета страны».

П. В. Луканин

8 Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги

16 Особенности разработки и изготовления зубчатых колес с помощью стереолитографической печати

59 Определение скорости осаждения механических примесей в предварительном цикле водоподготовки

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И КОМПОНОВКИ ГИДРОПЛАНОВ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Иван Владимирович Ключкин, Павел Викторович Кауров

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий
и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Ключкин И. В., Кауров П. В., 2026

Автор-корреспондент И. В. Ключкин, klushkin09@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена поэтапному расчету процесса обезвоживания бумажной массы в зоне формирования плоскосеточных бумагоделательных машин. Возможности обезвоживающих элементов определяют скорость сетки, а значит и производительность бумагоделательных машин. Сеточные части бумагоделательных машин предназначены для формирования и обезвоживания суспензии, превращения её в бумажное полотно и формирование слоя осевших волокон. В этой части из бумажной массы удаляется большая часть не соединенной молекулярно воды. Обезвоживание в сеточной части в 60 раз дешевле, чем в прессовой и в 10 раз, чем в сушильной части. Сейчас это особенно актуально, т. к. от процесса обезвоживания зависит производительность бумагоделательных машин и качество получаемой готовой продукции. Качество бумаги напрямую зависит от формирования бумажной массы на сеточном столе. Эффективность процесса обезвоживания определяется характером изменения концентрации массы и высоты слоя суспензии вдоль сеточного стола. Структура бумажных волокон оказывает значительное влияние на процесс обезвоживания и на структуру образовавшегося бумажного полотна. В ходе работы были исследованы параметры гидропланов на действующих бумагоделательных машинах и произведен расчет обезвоживания с учетом свойств бумажной массы. Процесс обезвоживания в зоне формирования зависит от обезвоживающих элементов и от их конструкции, в частности от углов наклона гидропланов и от их расположения. В результате оказалось, что использование математического моделирования процесса обезвоживания в зоне формирования позволяет проработать большое количество всевозможных решений для подбора оптимальной конструкции гидропланов и компоновки сеточного стола. В будущем на основе данного исследования можно на этапе проектирования, а также при модернизации создавать оптимальные схемы зоны формирования плоскосеточных бумагоделательных машин с точки зрения их обезвоживающей способности.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, обезвоживание бумажной массы, гидропланки, сеточный стол, участок формирования

Для цитирования: Ключкин И. В., Кауров П. В. Совершенствование конструкции и компоновки гидропланов на бумагоделательных машинах // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 25–30. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_25-30.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN AND LAYOUT OF PAPER MACHINE HYDROFOILS

Ivan Vladimirovich Klyushkin, Pavel Viktorovich Kaurov

Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg,
Russia

Corresponding author: I. V. Klyushkin, e-mail: klushkin09@mail.ru

ABSTRACT

The article is devoted to the stage-by-stage calculation of the dewatering process of paper pulp in the forming section of fourdrinier paper machines. The dewatering capacity of the elements determines the wire speed, and consequently, the productivity of paper machines. The wire sections of paper machines are designed to form and dewater the suspension, convert it into a paper web, and form a layer of settled fibers. The most of the free (unbound) water is removed from the paper pulp in this section. Dewatering in the wire section is 60 times cheaper than in the press section and 10 times cheaper than in the drying section.



This is especially relevant now, since the dewatering process determines the productivity of paper machines and the quality of the final product. Paper quality is directly determined by the formation of the paper stock on the wire frame. The efficiency of the dewatering process is determined by the dynamics of change in the mass concentration and the height of the suspension layer along the wire frame. The structure of paper fibers has a significant influence on the dewatering process and the structure of the formed paper web.

This study involved investigating hydrofoil parameters on operating paper machines and calculating dewatering with consideration for paper stock properties. Dewatering in the wire section is determined by the design and arrangement of the dewatering elements, particularly the tilt angles and placement of the hydrofoils. Therefore, mathematical modeling is a key tool for optimizing hydrofoil design and wire frame configuration by evaluating numerous dewatering scenarios. In the future, this research can be used to create optimal forming zone layouts for fourdrinier paper machines during the design stage and modernization with a focus on maximizing their dewatering capacity.

Keywords: paper machine, paper pulp drainage, hydrofoils, wire frame, forming section

For citation: Klyushkin I. V., Kaurov P. V. (2026) 'Improvement of the design and layout of paper machine hydrofoils', Technology and Energy, vol. 2, no. 2, pp. 25–30. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_25–30.

ВВЕДЕНИЕ

Главным оборудованием на целлюлозно-бумажных комбинатах является бумагоделательная машина (или БДМ). Её задача — превращать жидкую массу из волокон (суспензию) в готовую бумагу. Ключевой этап этого процесса — удаление воды, который происходит в так называемой «сеточной части» машины. Именно здесь масса начинает сильно обезвоживаться. Но важно не только это. Когда масса выливается на движущуюся сетку, потоки жидкости ориентируют волокна в определенном направлении — вдоль движения сетки. Это формирует слоистую структуру будущего бумажного полотна.

Таким образом, ключевые свойства бумаги закладываются в момент формирования полотна и напрямую зависят от процесса обезвоживания и укладки волокон. Исследованию обезвоживающей способности бумагоделательных машин в сеточной части посвящено большое количество научных трудов [1–4]. В нашей стране интерес к разработке таких методов расчета, в частности, вызван ещё и недостаточными возможностями по чисто экспериментальному определению обезвоживающей способности создаваемых сеточных частей на стадии проектирования.

Цель работы — проверка разработанной математической модели поэлементного расчета обезвоживания в зоне формирования бумагоделательных машин

и подбор оптимальной схемы сеточного стола с точки зрения максимально возможной обезвоживающей способности. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач: на действующих БДМ проверить разработанную математическую модель расчета процесса обезвоживания с учётом свойств бумажного полотна на этапе его формирования в сеточной части и подобрать расчетным путем оптимальную схему расположения и конструкцию гидропланок.

При предварительном определении обезвоживающей способности сеточных частей БДМ на стадии их разработки чисто экспериментальное её определение обычно трудоёмко и связано с большой затратой времени. Практическая значимость работы — использование методов математического моделирования может существенно облегчить ход проектирования и модернизации действующих бумагоделательных машин. Расчет обезвоживания в сеточной части бумагоделательных машин — это процесс со многими параметрами, направленный на снижение колебания качества бумаги и сохранение его на заданном уровне при длительных перерывах в работе, при смене параметров производства и после изменения расхода волокна. Для расчета обезвоживания в зоне формирования важным является прогнозирование свойств бумаги на основе данных о технологических параметрах процесса и конструктивных особенностей гидропланок. Расчетная схема сеточной части БДМ показана на рисунке 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Главными устройствами, которые удаляют воду на этапе формирования бумажного полотна в бумагоделательной машине, служат гидропланки. Их стандартное строение изображено на рисунке 2: с помощью обозначений X_k и X_f показано расположение элементов по горизонтали, а символом V обозначена скорость движения сетки.

Сетка бумагоделательной машины движется по ровной лицевой поверхности гидропланки. Передний край этого элемента скошен под углом 30 градусов для плавного контакта с сеткой; а основная рабочая поверхность может иметь очень небольшой уклон — от 0 до 5 градусов. При этом сама гидропланка должна быть абсолютно жесткой, чтобы не допустить даже малейшего изгиба или вибрации во время работы. Для создания



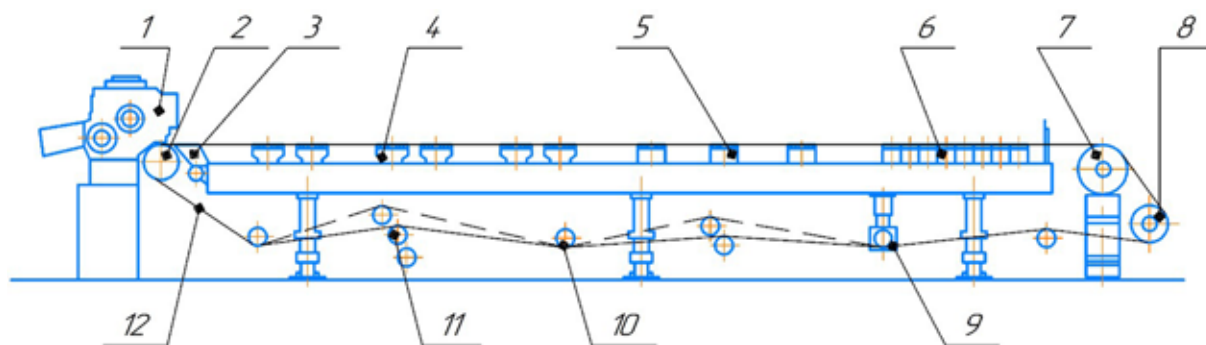


Рисунок 1. Сеточный участок бумагоделательной машины: 1 – напорный ящик; 2 – нажимной вал; 3 – формующий ящик; 4 – камера гидропланок; 5 – мокрый отсосной ящик; 6 – сухой отсосной ящик; 7 – гауч-вал; 8 – приводной валец; 9 – регистратор сетки; 10 – направляющий валец сетки; 11 – сетконатяжка; 12 – сетка

Figure 1. Paper machine wire section: 1 – head box; 2 – pressure roll; 3 – formation box; 4 – hydrofoils chamber; 5 – wet suction box; 6 – dry suction box; 7 – couch-roll; 8 – feed shaft; 9 – wire detector; 10 – wire guide roller; 11 – wire tensioner; 12 – wire

легкого импульса, заменяющего тряску и улучшающего формирование бумажного полотна, переднюю кромку гидропланки слегка закругляют. Кроме стационарных гидропланок применяют также гидропланки аналогичной формы, но с регулируемым углом наклона ее поверхности по отношению к сетке.

Основой для общего уравнения определения скорости фильтрации является закон Дарси [5]. Потеря напора описывается следующим уравнением:

$$\Delta H = \mu V_{\phi} a_g + \rho V_{\phi}^2 b_u,$$

где μ — динамическая вязкость воды (Па·с);
 V_{ϕ} — скорость фильтрации (с которой вода просачивается через массу) (м/с);
 ρ — плотность воды (кг/м³);
 a_g и b_u — коэффициенты, характеризующие сопротивление процессу обезвоживания: a_g отвечает за вязкостную составляющую, а b_u — за инерционную.

Расчет дренирования воды на свободных от прессования участках сетки выполняется по следующим формулам [4, 5]:

$$H(x) = h_n,$$

$$f(x) = \rho(x) \cdot g \cdot h_n,$$

где H — величина напора на участке, м;
 x — продольная координата вдоль оси сетки, м;
 g — гравитационная постоянная (ускорение свободного падения) (м/с²);
 h_n — сопротивление волокнистого слоя на сетке (м);
 $f(x)$ — функция изменения вакуума в зависимости от горизонтальной координаты (x).

Гидравлический напор на гидропланке вычисляется по формуле:

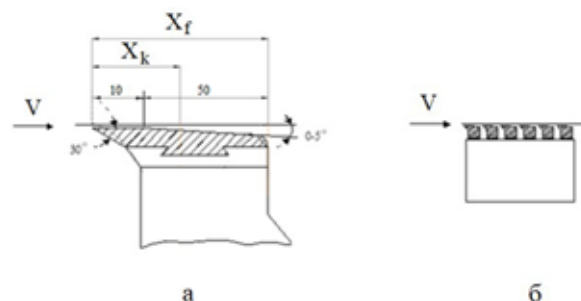


Рисунок 2. Гидропланки: а — одиночная гидропланка; б — блок гидропланок

Figure 2. Hydrofoils: a — single hydrofoil; b — hydrofoils block

$$H = \frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta \cdot h_p \cdot (1 - \cos \beta)}{8g \cdot X_k},$$

где X_k — горизонтальное расстояние от кромки гидропланки до зоны максимального давления восходящего фильтрационного потока (м);
 g — гравитационная постоянная (ускорение свободного падения, м/с²);
 h_p — высота слоя жидкой массы под сеточным полотном (м);
 β — заострения передней кромки гидропланки (°).

В следующей формуле представим скорость фильтрации:

$$V_{\phi} \cdot \sin \beta = \sqrt{2g(H - h_p - h_c)},$$

где h_n — сопротивление слоя бумажной массы на сетке (м) и h_c — гидродинамическое сопротивление сетки (м).

$$h_c = \zeta \cdot V_{\phi}^2,$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления сетки.



Рисунок 3. Начальные параметры для расчёта

Figure 3. Initial calculation parameters

Рисунок 4. Окно программы для ввода конструктивных параметров

Figure 4. Program window for input of design parameters

Скорость фильтрации воды в сбегающий водяной клин равна скорости увеличения расстояния между сеткой и наклонной поверхностью гидропланки:

$$V_{\phi} = V \cdot \operatorname{tg} \gamma,$$

где V — скорость сетки (м/с); γ — угол наклона гидропланки (градусы), поэтому высота слоя удаленной воды равна высоте слоя сбегающего водяного клина:

$$\Delta h = y = X \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Так как процесс обезвоживания описывается уравнением баланса массы —

$$h_0 = h_n + \Delta h$$

и баланса волокна, определяется

$$h_0 C_0 = (h_n - \Delta l) C_0 + \Delta l \cdot C + \Delta h \cdot C_R,$$

где: Δl — прирост фильтрующего слоя (м);
 h_0, h_n — высота надсеточного слоя до и после обезвоживания соответственно (м);
 C_0 — концентрация массы в надсеточном слое (%);
 C — концентрация слоя осевших волокон (%);
 C_R — концентрация подсеточной воды (%).

Исходя из вышесказанного, скорость фильтрации можно выразить так:

$$V_{\phi} = \frac{d(\Delta h)}{dt} = \frac{V \cdot d(\Delta h)}{dX},$$

где Δh — толщина слоя бумажной массы, м.

Отсюда высота слоя удаленной воды окончательно будет равна:

$$\Delta h = \int_0^{X_k} \frac{1}{V_{\phi}} \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta}{2g} \sin \frac{\pi X}{2X_k} - h_n - \zeta \cdot V_{\phi}^2 \cdot \sin^2 \beta \right)} dX + \int_{X_k}^{2X_k} \frac{1}{V_{\phi}} \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta}{2g} \left(1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k} \right) - h_n - \zeta \cdot V_{\phi}^2 \cdot \sin^2 \beta \right)} dX.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс удаления воды был рассчитан пошагово для каждого участка сеточной части в отдельности. Расчёт для каждого следующего участка начинался с тех значений, которые были получены в результате вычислений для предыдущего участка. Таким образом, конечные данные одного этапа служили начальными данными для следующего расчета (см. рисунок 3).

На следующем шаге в программу вносятся данные о конструкции каждого компонента сеточного отделения бумагоделательной машины (см. рисунок 4). Назовем эти параметры: длина напорного порога (грудной доски); длина наклонной рабочей поверхности гидропланки; угол, под которым установлена гидропланка относительно сетки; угол скоса передней кромки гидропланки; промежутки между всеми обезвоживающими элементами.

Расчёты для каждого элемента сеточного отдела бумагоделательных машин были выполнены с помощью алгоритма, заложенного в программу «Расчет мокрой части БДМ v 2.7.5». Внешний вид этой программы показан на рисунке 5.

С её помощью проанализировали процесс удаления воды из бумажной массы на работающих промышленных машинах, а результаты этих вычислений приведены в источнике [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью специально созданной программы поэлементного расчета «Расчет мокрой части БДМ v 2.7.5» и предложенного алгоритма было выполнено определение сухости бумажной массы, которое учитывает конструкцию гидропланок для определения эффективности обезвоживания на сеточной части бумагоделательных машин в зоне формирования бумажного полотна.

Результаты этого моделирования и изучения процессов обезвоживания и формирования позволили сформулировать научно обоснованные предложения по улучшению устройства и конструкции обезвоживающих элементов в бумагоделательных машинах. В частности, было

установлено, что эффективность удаления воды можно повысить, изменяя углы наклона гидропланов и оптимально располагая их в зоне формирования, что позволяет из множества вариантов выбрать оптимальный.

Используя предложенную методику расчета обезвоживания в сеточных частях, можно существенно облегчить ход проектирования новых и модернизации действующих бумагоделательных машин.

Список литературы

1. Sjöstrand B. (2025) Easy-to-use numerical models of water removal in vacuum dewatering and molding during through air drying of tissue paper. *Drying Technology*. 43:(4);668–678. DOI: 10.1080/07373937.2024.2449177.
2. Hubbe M. A., Sjöstrand B., Nilsson L. et al. (2020) Rate-limiting mechanisms of water removal during the formation, vacuum dewatering, and wet-pressing of paper webs: areview. *BioResources* 15:9672–9755. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.hubbe>.
3. Коряковская Н. В., Бедердинова О. И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2022. № 1. С. 188–204.
4. Vieira J. C., Fiadeiro P. T., Costa A. P. (2023). Converting operations impact on tissue paper product properties: a review. *BioResources*. 18:(1); 2303–2326. DOI: 10.15376/biores.18.1Vieira.
5. Ревунов М. С. Моделирование поверхности потока бумажной массы на сетке бумагоделательной машины / М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов. М: Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2020. С. 43–50.
6. Ключкин И. В. Моделирование обезвоживания в зоне формирования бумагоделательных машин с учетом вариабельности свойств бумажной массы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. В. Ключкин; Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. СПб., 2022. 121 с.

References

1. Sjöstrand B. (2025) Easy-to-use numerical models of water removal in vacuum dewatering and molding during through air drying of tissue paper, *Drying Technology*, 43:4, 668–678, DOI: 10.1080/07373937.2024.2449177.

Информация об авторах

Ключкин Иван Владимирович, кандидат технических наук, заместитель директора института технологии, преподаватель кафедры основ конструирования машин Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4; SPIN-код: 1112–3051; e-mail: klushkin09@mail.ru.

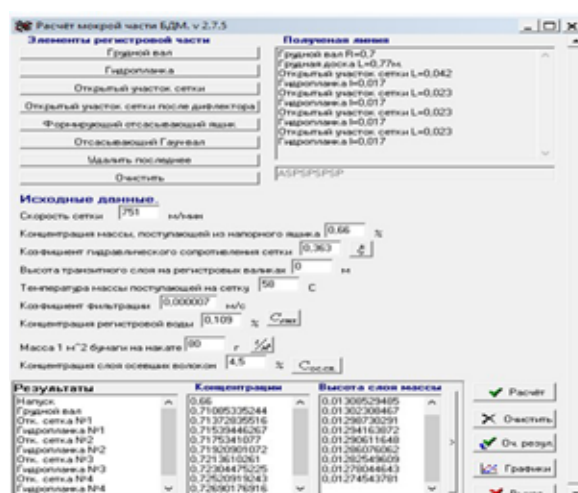


Рисунок 5. Окно программы с полученными результатами элементного обезвоживания в сеточной части БДМ

Figure 5. The program window with the obtained results of element-by-element dewatering in the paper machine wire section

2. Hubbe M. A., Sjöstrand B., Nilsson L. et al. (2020) Rate-limiting mechanisms of water removal during the formation, vacuum dewatering, and wet-pressing of paper webs: areview. *BioResources* 15:9672–9755. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.hubbe>.
3. Koryakovskaya N. V., Bederdinova O. I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 188–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-188-204>.
4. Vieira J. C., Fiadeiro P. T., Costa A. P. (2023). Converting operations impact on tissue paper product properties: a review. *BioResources*. 18:(1); 2303–2326. DOI: 10.15376/biores.18.1Vieira.
5. Revunov M. S., Salmov E. N. Simulation of paper pulp flow surface on paper making machine fabric. Moscow: Measurement. Monitoring. Management. Control, 2020. Pp. 43–50.
6. Klyushkin I. V. Modeling of dewatering in the formation zone of papermaking machines, taking into account the variability of the properties of paper pulp: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg state university of industrial technologies and design, 2022. 121 p.

Кауров Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4; SPIN-код: 7225–7852, e-mail: pusto@mail.ru.

■ Information about the authors

Klyushkin Ivan Vladimirovich, PhD in Engineering, Deputy Director of the Institute of Technology, Lecturer at the Department of Machine Design Fundamentals of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 1112–3051; e-mail: klushkin09@mail.ru.

Kaurov Pavel Viktorovich, PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Machine Design Fundamentals of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 7225–7852, e-mail: pucmo@mail.ru.