

# ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ДЕЛО. ПОЛИГРАФИЯ

УДК 667.6

**С. Н. ЛИТУНОВ  
М. А. СВЕТУС**Омский государственный  
технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Приводятся результаты экспериментов по определению электропроводности коллоидных растворов с использованием технического углерода УМ 76 с целью определения возможности его использования при изготовлении электропроводной краски. На основе полученных данных рассчитывается уравнение регрессии, описывающее зависимость электропроводности от концентрации составляющих раствора.

**Ключевые слова:** электропроводная краска, технический углерод, уравнение регрессии, планирование эксперимента, обработка экспериментальных данных.

**Введение.** Использование электропроводных красок продолжает расти быстрыми темпами. В России электропроводные краски ранее изготавливались экспериментальными партиями, в частности, на Торжокском заводе полиграфических красок (АО ТЗПК). Основными компонентами электропроводной краски являются связующее (смола-пленкообразователь) и электропроводный пигмент. В качестве пигмента лучше всего для этих целей подходит технический углерод. Частицы пигмента в толще связующего соединяются между собой и образуют непрерывный электрический проводник. В связи с ростом потребности в

таких красках нами были проведены исследования, основной целью которых было определение возможности использования в качестве электропроводного связующего технического углерода, который производится на АО «Омсктехуглерод». Данные исследования проводились по предварительной договоренности с АО ТЗПК, где в дальнейшем предполагается разработка и производство электропроводной краски промышленными партиями.

**Используемые величины.** Проводниками называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропро-

№	Показатели качества производимой сажи, обязательные для проверки	Норма	Область применения
1	Удельная внешняя поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	155 – 180	Сырье для производства шин и технических изделий
2	Йодное число, г/кг	280 – 350	
3	Абсорбция дибутилфталата, $\text{см}^2/100\text{г}$	95 – 115	
4	Массовая доля потерь при нагревании, %, не более	0,9	
5	Зольность, %, не более	1,0	
6	Массовая доля остатка после просева через сито с сеткой, %, не более: 0,5 0,045	0,001 0,1	
7	Массовая доля общей серы, %, не более	1,1	
8	Массовая доля мелких частиц в гранулированном техуглероде, не более	4,0	
9	Насыпная плотность гранулированного техуглерода, $\text{кг}/\text{м}^3$	300	

водность [1]. В данной работе оценивается возможность разработки полиграфической краски, обладающей электропроводностью, которая является величиной, обратной сопротивлению участка цепи, то есть  $G = 1/R$  и измеряется в сименсах (См, S) или  $\text{Ом}^{-1}$ . Удельная электрическая проводимость вещества — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению и измеряемая в сименсах на метр (См/м, S/m). Приведенные выше определения являются классическими в физике, но они применимы больше для твердых веществ, поэтому ниже будет приведено определение электропроводности растворов.

Удельная электропроводность раствора электролита представляет собой электропроводность  $1 \text{ м}^3$  раствора, помещенного между параллельными электродами площадью  $1 \text{ м}^2$  при расстоянии между ними  $1 \text{ м}$ . Проводимость раствора, как правило, зависит от концентрации электролита C. Удельная электропроводность раствора является характеристикой раствора. При этом, зная геометрические параметры емкости, в которую помещен раствор и значение удельной электропроводности раствора, мы сможем узнать значение электропроводности данного участка цепи по формуле:  $G_k = \beta/K_x$ , где  $G_k$  — проводимость раствора в ячейке,  $\beta$  — удельная электропроводность раствора,  $K_x$  — геометрическая постоянная ячейки.

Геометрическую постоянную ячейки  $K_x$  можно найти по формуле  $K_x = L_x/S_x$ , где  $S_x$  — средняя площадь сечения жидкостного столба раствора,  $L_x$  — расстояние между электродами.

Для разработки электропроводной краски на основе сырья местного производства, необходимо было получить представление о поведении этого параметра в зависимости от концентрации углерода в растворе, который должен обладать стабильными и известными наперед свойствами. По согласованию со специалистами центральной заводской лаборатории ТЗПК в качестве основы раствора была выбрана дистиллированная вода. Для придания дистиллированной воде электропроводных свойств в нее добавляли соль — химически чистый KCl. Для оценки влияния соли на электропроводность раствора были проведены отдельные опыты по определению электропроводности раствора в зависимости от концентрации соли в дистиллированной воде. Так, было проведено три серии экспериментов по оценке значения электропроводности полученного раствора:

— измерение значения электропроводности раствора коллоида технического углерода в дистиллированной воде, в зависимости от их массового соотношения;

— измерение значения электропроводности раствора соли KCl в дистиллированной воде, в зависимости от массового соотношения соли и воды;

— измерение значения электропроводности раствора KCl и технического углерода в дистиллированной воде в зависимости от массового соотношения всех трех компонентов.

Исследуемые растворы (технический углерод в дистиллированной воде, технический углерод в растворе соли KCl в дистиллированной воде) представляют собой коллоидные растворы.

**Применяемые вещества.** Технический углерод. Основным из исследуемых веществ является продукция АО «Омсктехуглерод» — технический углерод марки УМ 76, которая была выбрана после консультации с технологами завода. Этот сорт углерода имеет наиболее высокую электропроводность из всех марок, выпускаемой серийно на АО «Омсктехуглерод». Углерод УМ 76 представляет собой порошок черного цвета и, согласно качественному удостоверению, обладает свойствами, представленными в табл. 1.

На рис. 1 представлена фотография технического углерода УМ 76. Он представляет собой порошок с размерами частиц  $10^{-8} - 10^{-4} \text{ м}$ , который является полидисперсным и склонен к образованию крупных агрегатов. В целом порошки имеют капиллярную структуру (обладают пористостью), что усиливает их адсорбционные свойства.

**Соль KCl.** Для проведения экспериментов использовалась соль KCl, так как она является достаточно сильным электролитом при растворении в воде.

**Дистиллированная вода.** При проведении экспериментов в качестве основы (дисперсионной среды) была использована дистиллированная вода, которая была выбрана в связи с необходимостью стабилизировать поведение коллоидного раствора и его электропроводности. С целью повышения точности эксперимента дистиллированная вода была получена в химической лаборатории АО «Омскэнерго» с выдачей качественного удостоверения.

**Экспериментальная часть.** Измерения электропроводности производились: в растворе соли KCl в дистиллированной воде; технического углерода

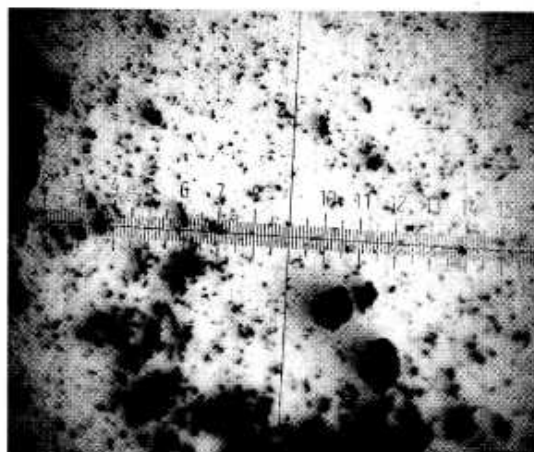


Рис. 1. Фото углерода УМ 76

в дистиллированной воде; соли KCl и технического углерода в дистиллированной воде. Представленные системы можно отнести к коллоидным растворам [2]. В данной работе приводятся результаты экспериментов по определению электропроводности только коллоида с использованием дистиллированной воды, KCl и технического углерода, как наиболее важные для разработки электропроводной краски.

В данной работе было решено проводить эксперименты с использованием методов математической статистики и их результаты обработать с целью получения математического выражения, позволяющего спрогнозировать электропроводные свойства исследуемых растворов.

При проведении опытов использовались массовые соотношения компонентов, так как при приготовлении красок легче использовать именно такой принцип. Исследуемые растворы приготавливались исходя из предположения, что оптимальная концентрация пигмента в трафаретной краске может находиться в пределах 5 – 25 % по массе. Также были проведены исследования электропроводности раствора соли KCl в дистиллированной воде, с различным массовым соотношением соли и воды. В данном случае диапазон исследований был ограничен возможностями измерительного оборудования (кондуктометра), так как с его помощью можно измерять электропроводность до значений, не превышающих 10 См/м. При этом были исследованы растворы KCl от 0,5 до 10 %. При 10 % KCl значение электропроводности составило 9,3 См/м. Так как максимальная электропроводность, фиксируемая прибором составляет 10 См/м, то более высокие концентрации соли не рассматривались.

Для того чтобы измерить электропроводность раствора с помощью кондуктометра, необходимо было приготовить минимум 25 миллилитров раствора (этого требуют конструктивные особенности прибора). Для приготовления растворов было решено принять за 100 % объем раствора в 30 миллилитров. После получения необходимой навески вещества оно помещалось в специальную пробирку с метками, указывающими на различный объем содержащегося в ней вещества. Затем доливалась дистиллированная вода до отметки 30 миллилитров. Таким образом были получены необходимые для исследований коллоидные растворы.

Измерения электропроводности растворов были проведены с помощью прибора – кондуктометра типа N-5721 (рис. 2) совместно с содействующим кон-

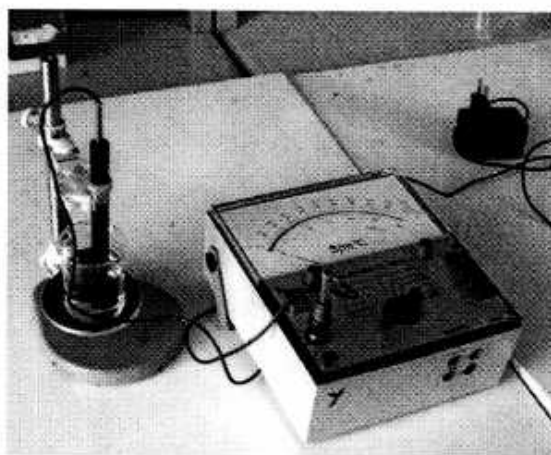


Рис. 2. Экспериментальная установка с использованием кондуктометра типа N-5721

дуктометрическим датчиком N-5981 предназначен непосредственных измерений проводимости (электролитической проводимости) водных растворов и их температуры. Пределы измерения прибора  $0 - 3 \cdot 10^{-4} \dots 10$  См/м. Основная погрешность составляет  $\pm 1$  % (для  $3 \cdot 10^{-4}$  См/м) ...  $\pm 2$  % (для 10 См/м). Измерения проводились по стандартной методике согласно паспорту на прибор.

Поскольку количество варьируемых факторов было равно 2, было решено провести полнофакторный эксперимент. Перед составлением матрицы планирования необходимо определить факторы, влияющие на функцию отклика и уровни их варьирования. На электропроводность раствора влияет массовое соотношение в нем соли KCl и технического углерода с дистиллированной водой. Значения массовых долей соли KCl будем изменять от 0,5 до 8 %, так как верхним пределом измерений прибора кондуктометра является величина 10 См/м. Значение электропроводности 8 % раствора KCl равно 8 См/м, но при добавлении в раствор углерода предполагается, что значение электропроводности повысится. Интервал 5 – 25 % для углерода выбран после консультаций со специалистами АО ТЗПК с учетом того, что оптимальная концентрация пигмента в печатной краске находится в этих пределах.

**Обработка экспериментальных данных.** В табл. 2 представлена матрица планирования и рабочая матрица эксперимента. Расчеты проводились по методике, описанной в [3].

По полученным результатам был определен критерий Кохрена  $G_p = 0,638681$ . Полученное значение  $G_p$  меньше табличного значения  $G_p = 0,967$ , что позволяет с доверительной вероятностью, равной 95 %, считать дисперсии ошибок однородными. На этом основании были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии:  $b_0 = 5,76$ ;  $b_1 = 3,565$ ;  $b_2 = 0,915$ ;  $b_{12} = -0,39$ .

Рассчитанный критерий Стьюдента  $t = 2,776$ . Доверительный интервал  $\Delta b = \pm 0,2297548$ . Согласно полученным данным, все рассчитанные коэффициенты уравнения регрессии значимы, а само уравнение имеет вид:

$$Y = 5,76 + 3,565X_1 + 0,915X_2 - 0,39X_1X_2.$$

Проверка посредством критерия Фишера показала адекватность рассчитанной модели экспериментальным данным.



№ опыта	Матрица планирования		Рабочая матрица		Результаты опытов						
	$X_1$	$X_2$	Масс. доля KCl	Масс. доля сажи	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$	$\bar{Y}_1$	$S^2_{\text{ост}}$	$Y_{\text{факт}}$	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_1)^2$
1	+	+	8	25	9,8	9,8	9,95	9,85	0,0075	9,85	0
2	—	+	0,5	25	3,3	3,6	3,6	3,5	0,03	3,5	0
3	+	—	8	5	8,5	8,9	9	8,8	0,07	8,8	0
4	—	—	0,5	5	0,84	0,9	0,93	0,89	0,0021	0,89	0

Полученные данные позволяют сделать предварительный вывод и возможности использования технического углерода УМ 76 в качестве пигмента электропроводной краски, поскольку концентрация углерода оказывает существенное влияние на электропроводность исследуемого раствора. Результаты проведенных экспериментов были переданы на АО ТЗПК с целью разработки электропроводной краски. В случае положительных результатов при разработке краски в условиях производства АО «Омсктехуглерод» получит дополнительный рынок сбыта своей продукции.

#### Выводы.

1. В качестве пигмента электропроводной краски был выбран технический углерод марки УМ 76 производства АО «Омсктехуглерод».

2. Проверка электропроводных свойств технического углерода в растворе соли показала зависимость электропроводности полученного коллоида от концентрации, как соли, так и углерода.

3. Полученные данные позволяют сделать предварительный вывод о возможности использования технического углерода УМ 76 в качестве пигмента электропроводной краски.

4. Рассчитанная по стандартной методике математическая модель адекватна экспериментальным дан-

ным и позволяет прогнозировать электропроводность коллоида при разработке электропроводной краски.

#### Библиографический список

1. Пасынков, В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники: учеб. для студ. вузов / В.В. Пасынков, В. С. Сорокин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.
2. Кировская, И. А. Коллоидная химия. Ультрамикрорегенные и микрогетерогенные системы: учеб. пособие / И.А. Кировская. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. — 72 с.
3. Иванов, А.Ю. Основы планирования экспериментов в наборной технике: конспект лекций / А.Ю. Иванов. — Омск: Изд-во ОмПИ, 1982. — 48 с.

**ЛИТУНОВ Сергей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства». Адрес для переписки: e-mail: litunov@rambler.ru  
**СВЕТУС Марина Александровна**, студентка гр. ПТ-416.

Статья поступила в редакцию 27.11.2009 г.  
 © С. Н. Литун, М. А. Светус

## Книжная полка

**Офицеров, В. В. Основы производственных процессов: технологии допечатного производства [Текст]: учеб. пособие / В. В. Офицеров; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. — 160 с.: рис., табл. — ISBN 978-5-8149-0747-9.**

Рассмотрены первые шаги создания письменности и становления книгопечатания. Даны основные понятия о полиграфической продукции, применяемых способах печати, принципах построения полиграфического производства.

Рассматриваются основы допечатного производства, в том числе вопросы редакционно-издательской подготовки оригиналов, принципы технологических процессов цифровой обработки на всех этапах изготовления печатных форм (CTF, ClP, ClPress, ClPrint).

**Варепо, Л. Г. Полиграфические материалы. Бумага [Текст]: учеб. пособие для вузов по специальности 261202 «Технология полиграфического производства» / Л. Г. Варепо; ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 131 с.: рис., табл. - Библиогр.: с. 111-114. — ISBN 978-5-8149-0819-3.**

Рассматриваются вопросы классификации бумаги, ее виды и свойства, характеристика полуфабрикатов, технологические особенности производства бумаги.

## К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ КРАСКИ В ПИТАЮЩЕЙ ГРУППЕ КРАСОЧНЫХ АППАРАТОВ ОФСЕТНЫХ МАШИН

Строится модель течения краски в питающей группе красочного аппарата офсетной машины, основанная на модели течения невязкой жидкости. Модель построена с использованием теории конформных отображений и позволяет проводить визуальный анализ течения, а также качественную оценку распределения давления в зоне течения краски в зависимости от параметров работы машины.

**Ключевые слова:** офсетная печать, короткий красочный аппарат, идеальная жидкость, функция тока, потенциал скоростей

**Введение.** Современное полиграфическое производство характеризуется высокой конкуренцией не только среди полиграфических предприятий, но и между способами печати. Это относится, прежде всего, к некоторому противостоянию между офсетным и электрографическим способами печати в области небольших тиражей. Для повышения конкурентоспособности офсетной техники разработчики применили красочный аппарат, в который входит в качестве дукторного — анилоксый цилиндр и всего один раскатной вал. Такой красочный аппарат позволяет сократить время выхода на режимы печати и значительно сократить технологические отходы. Однако этот красочный аппарат имеет недостаток, который заключается в отсутствии зональной регулировки подачи краски. Несмотря на заявления изготовителей печатных машин о том, что в данном случае зональная регулировка краски не нужна, анализ оттисков, полученных на машине с указанным красочным аппаратом, показывает, что это справедливо только при печатании сюжетов, имеющих насыщенность выше среднего. На светлых участках изображения, где площадь печатающих элементов мала, наблюдается избыток краски, который искажает градиционные и цветовые характеристики. Для решения этой проблемы было предложено анилоксый вал изготовить с упругой крышкой, на поверхности которой расположены углубления необходимого размера и расположения. В качестве упругого материала возможно использовать фотополлимер или резину, на поверхности которых ячейки могут быть получены фотомеханическим способом или методом лазерного гравирования соответственно. Особенность работы питающей группы в данном случае заключается в том, что давление, возникающее при движении краски, деформирует не только ракель, но и саму упругую оболочку. Это приводит к нелинейности размеров зазора между ракелем и упругой крышкой и изменению толщины красочного слоя в зависимости от скорости вращения дуктора. Для преодоления этого препятствия можно рекомендовать изменение усилия

прижима металлического ракеля к упругой оболочке в зависимости от скорости печати, для чего хорошо подходят стандартные устройства регулирования зональной подачи краски с автоматическим приводом. Однако для использования таких устройств необходимо создать математическую модель, которая позволила бы определять усилие прижима в зависимости от параметров машины и краски и режимов печатания. Первым шагом в разработке такой модели является моделирование течения краски в красочном ящике.

**Постановка задачи.** Для расчета гидродинамического давления, возникающего при движении краски в питающей группе красочного аппарата использовалась модель движения идеальной (невязкой) жидкости. Для построения модели сделаем ряд допущений, обоснованных в работе [1]:

- краска является несжимаемой жидкостью;
- течение жидкости является стационарным и рассматривается в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра;
- цилиндр и ракель являются абсолютно жесткими;
- количество краски остается постоянным;
- зазор между цилиндром и ракелем постоянный;
- течение краски является потенциальным.

Для описания движения идеальной жидкости используют уравнение Эйлера, которое после преобразования может быть приведено к более простому виду, получившему название интеграла Бернулли [2]:

$$\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} - U = A, \quad (1)$$

где  $U$  — потенциал массовых сил,  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $A$  — некоторая постоянная величина. Рассматриваемое течение с учетом сделанных допущений является плоским, установившимся, потенциальным движением идеальной, однородной, несжимаемой жидкости. Для этого случая величина  $A$  становится постоянной в любой точке жидкой массы.

В случае рассмотрения плоского случая движения невязкой жидкости, условие потенциальности приводит к тому, что движение жидкости характеризуется двумя функциями [3]:  $\phi$  — потенциалом скорости и  $\Psi$  — функцией тока, которые связаны со скоростью следующими зависимостями:

$$V = \frac{d\phi}{dx} + \frac{d\phi}{dy}, \quad \frac{d\phi}{dx} = \frac{d\Psi}{dy}, \quad \frac{d\phi}{dy} = -\frac{d\Psi}{dx}. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет применить для описания теории функции комплексной переменной. Согласно этой теории, поток характеризуется комплексным потенциалом  $\omega(z) = \phi + i\Psi$ , производная которого представляет собой комплексную скорость [4]. Таким образом, задача по моделированию потока на начальном этапе сводится к отысканию такого комплексного потенциала, картина линий тока которого соответствует поставленной задаче.

**Решение.** Одним из распространенных способов моделирования является моделирование течения в бесконечном потоке жидкости. Для моделирования обтекания цилиндра воспользуемся свойством суперпозиции потоков, который позволяет алгебраическим сложением из простых течений получить сложное. Для этого рассмотрим поток, состоящий из суммы поступательного потока и диполя, имеющих комп-

лексные потенциалом  $\omega_1(z) = V_\infty \cdot z \cdot e^{-i\alpha}$  и  $\omega_2(z) = V_\infty \cdot$

$\frac{e^{-i\alpha} \cdot R^2}{z}$  соответственно, где  $z$  — комплексная константа,  $\alpha$  — угол, под которым натекает поток,  $R$  — некая константа,  $V_\infty$  — скорость поступательного потока на бесконечности. При сложении комплексных потенциалов диполя и сплошного потока образуется картина линий тока, которая трактуется как обтекание бесконечным поступательным потоком кругового цилиндра. Линия тока в виде окружности радиуса  $R$  представляет собой замкнутую линию, и ее можно трактовать как непроницаемую границу. Течение жидкости внутри цилиндра для данной задачи не имеет физического смысла и рассматриваться не будет.

Вихреобразование в идеальной жидкости невозможно ввиду отсутствия внутреннего трения, однако если поместить в течение вихрь, то полученное суммарное течение хорошо согласуется с практикой. Для моделирования вихря воспользуемся выражением, представляющим собой комплексный потенциал и функцию тока вихревой нити (далее вихрь) с интенсивностью  $G$  и центром в точке  $z_1$ :

$$\omega_3(z) = G_1 \cdot i \cdot \ln(z - z_1),$$

$$\Psi_3(x, y) = G_1 \cdot \ln \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}.$$

Введение в поток вихря вне окружности радиуса  $R$  искажает границы цилиндра. Для восстановления формы окружности необходимо ввести в поток систему компенсирующих вихрей. Один из них находится в центре цилиндра с направлением вращения, совпадающим с направлением вращения индуцирующего вихря. Второй вихрь расположен в точке, отраженной от центра прямого вихря относительно цилиндра и направлением вращения, противоположным направлению вращения прямого вихря. Положительное значение циркуляции соответствует вращению вихря против часовой стрелки. Далее будем

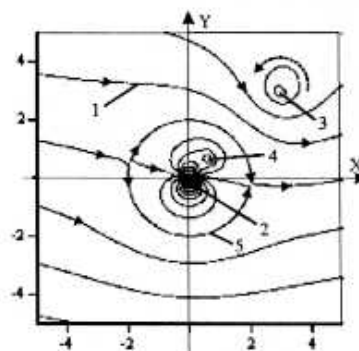


Рис. 1. Обтекание цилиндра сплошным потоком с прямым и отраженными вихрями:

- 1 — линии тока сплошного потока;
- 2 — центр диполя и отраженного в центре вихря;
- 3 — центр прямого вихря;
- 4 — центр отраженного относительно окружности вихря;
- 5 — линия тока в виде окружности;  $R=2$ ;  $G_1=1$ ;  $V_\infty=1$

называть вихрь, индуцированный вращением цилиндра прямым, а систему компенсирующих вихрей отраженными вихрями. Комплексный потенциал и функция тока системы отраженных вихрей имеет вид:

$$\omega_4(z) = -G_1 \cdot i \cdot \ln \left( \frac{R^2}{z - z_1} \right),$$

$$\Psi_4(x, y) = -G_1 \cdot i \cdot \ln \sqrt{\left( \frac{R^2 \cdot x}{x^2 + y^2} - x_1 \right)^2 + \left( y_1 - \frac{R^2 \cdot y}{x^2 + y^2} \right)^2},$$

где  $\bar{z}_1$  — сопряженная относительно  $z_1$  точка комплексной плоскости,  $R$  — радиус цилиндра. На рис. 1 показано обтекание цилиндра поступательным потоком в присутствии вихря и системы отраженных вихрей. Бесконечный поступательный поток 1 набегаёт слева направо со скоростью в бесконечности  $V_\infty$ , линия тока 5 имеет форму окружности радиуса  $R$ . Дойдя до окружности, поток плавно огибает её и уходит в бесконечность. В точке 3 располагается центр вихревой нити, под действием циркуляции которой соседние слои затягиваются по направлению вращения. Отрицательное значение циркуляции соответствует вращению жидкости против часовой стрелки (показано стрелкой). Для восстановления искажения окружности, возникающей вследствие введения в поток вихревой нити, в точку 4 помещен отраженный относительно окружности вихрь, а в точку 2 вихрь, центр которого совмещен с центром окружности.

Ракельный нож представляет собой тонкую пластинку. Для моделирования обтекания ракельного ножа воспользуемся обратным преобразованием Жуковского:

$$z = \frac{1}{2} \left( Z + \sqrt{Z^2 - c^2} \right), \quad (3)$$

где  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ . Данное преобразование конформно отображает окружность на эллипс с осями  $a$  и  $b$ . Если положить одну из полуосей эллипса равной нулю, то он вырождается в линию длиной  $2a$ . Для осуществления преобразования необходимо решить уравнение (3) с комплексными потенциалами слагаемых, входящих в суммарный поток. В результате преобразования получены выражения для поступательного потока,



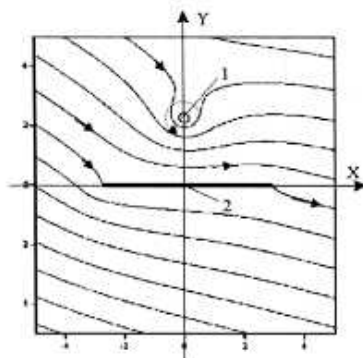


Рис. 2. Обтекание пластинки поступательным потоком в присутствии вихря: 1 – вихревая нить; 2 – пластинка;  $z_1(-1; 2)$

диполя, прямого вихря и системы отраженных вихрей соответственно:

$$\omega_1 = \frac{1}{2}(Z + \sqrt{Z^2 - c^2}) \cdot V_\infty \cdot e^{-i\alpha}$$

$$\omega_2 = V_\infty \cdot \frac{2R^2 \cdot e^{i\alpha}}{c^2} \cdot (Z - \sqrt{Z^2 - c^2}),$$

$$\omega_3(z) = -G_1 \cdot i \cdot \ln\left(\frac{1}{2}(Z - \sqrt{Z^2 - c^2}) - z_1\right),$$

$$\omega_4(z) = G_1 \cdot i \cdot \ln\left(\frac{1}{2}(Z - \sqrt{Z^2 - c^2}) - \frac{R^2}{z_1}\right).$$

Выделив из полученных выражений мнимую часть, получим функцию тока отображенного течения:

$$\Psi_1(x, y) = V_\infty \left[ \frac{-\sin \alpha \cdot (x - x_1 + F \cdot \cos \Theta) +}{2} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{+\cos \alpha \cdot (y - y_1 + F \cdot \sin \Theta)}{2} \right],$$

$$\text{где } F = \sqrt{(x^2 - y^2 - c^2) + (2xy)^2}, \quad \Theta = \arctg \frac{2xy}{x^2 - y^2 - c^2}.$$

В виду того, что полученные выражения однотипны, функции тока остальных потоков не будут приведены. На рис. 2 показано обтекание пластинки длиной  $2a = 6$  поступательным потоком, направленным под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонтальной оси в присутствии вихря интенсивностью  $G_1 = 0,8$ . Стрелками показано направление движения жидкости. Поток, набегающий слева направо, доходит до левой кромки пластинки, огибает ее с двух сторон и срывается с другого конца. Циркуляция вихря 1 имеет положительный знак и соответствует вращению против часовой стрелки. Вследствие влияния на поток циркуляционного потока, создаваемого вихрем, линии тока расположены возле центра вращения изгибаются, что соответствует вовлечению в процесс вращения близлежащих слоев жидкости. Отметим, что внутри линии, моделирующей пластинку, находятся отраженные вихри, компенсирующие искажение, возникающее от действия внешнего вихря 1.

Для моделирования кругового цилиндра, имеющего радиус  $R_z$ , который моделирует дукторный ци-

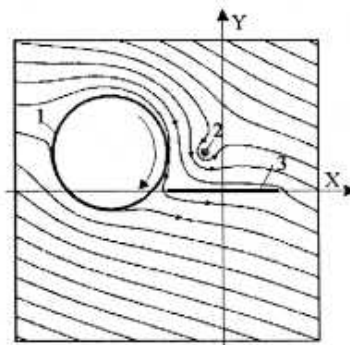


Рис. 3. Обтекание пластинки поступательным потоком в присутствии вихря и цилиндра с циркуляцией: 1 – цилиндр; 2 – вихрь; 3 – пластинка;  $R=5; G_1=1$

линдр, поместим диполь в точку  $z_2$  комплексной плоскости. Угол между касательной к круговому цилиндру, проведенной в точке касания цилиндра и ракеля, обозначим  $\beta$ . Между окружностью и пластинкой зададим расстояние, равное  $d$ .

Введение в поток еще одного диполя вызывает появление линии тока в виде окружности радиуса  $R_z$ , что сопряжено с необходимостью введения в поток дополнительной системы вихрей, отраженных относительно этой окружности. Комплексный потенциал диполя с центром в точке  $z_2$ , моделирующий окружность радиуса  $R_z$ , имеет вид [5]:

$$\omega_5(z) = \frac{2V_\infty \cdot R_z^2 \cdot e^{-i\alpha}}{z + \sqrt{z^2 - c^2} - 2 \cdot z_2}.$$

Комплексный потенциал отраженного в центре вихря:

$$\omega_6(z) = -G_1 \cdot i \cdot \ln\left(\frac{1}{2}(Z + \sqrt{Z^2 - c^2}) - z_2\right).$$

Комплексный потенциал отраженного относительно окружности вихря аналогичен предыдущему и отличается лишь положением центра на комплексной плоскости, который определяется координатой  $z_2$ .

Для моделирования вращения цилиндра с центром в точке  $z_2$  поместим в центр окружности вихрь с интенсивностью  $G_2$  и отрицательной интенсивностью. При этом для сохранения профиля пластинки требуется введение в поток системы отраженных относительно вихря в центре окружности вихрей. После выполнения указанных операций суммарный поток включает в себя следующие элементарные потоки:

- поступательный поток, направленный под углом к оси ОХ;
- диполь в начале координат;
- диполь в точке  $z_2$ ;
- прямой вихрь с центром в точке  $z_1$  с положительной циркуляцией;
- система отраженных от пластинки и от цилиндра вихрей, вызванная внесением в поток вихря с центром в точке  $z_1$ ;
- вихрь в центре окружности;
- система отраженных от пластинки вихрей, вызванная внесением в поток вихря в точке  $z_2$ .

На рис. 3 показано суммарное течение, полученное при сложении вышеуказанных потоков. Данная картина представляет собой обтекание цилиндра поступательным потоком, набегающим слева направо со скоростью на бесконечности  $V_\infty$ . В потоке распо-

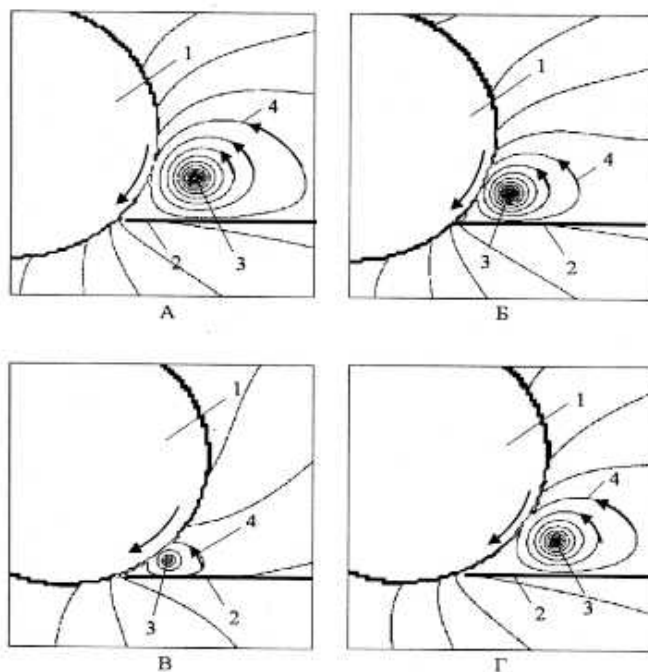


Рис. 4. Эволюция линий тока при различных параметрах течения:  
1 – профиль цилиндра; 2 – пластинка; 3 – центр вихревой нити; 4 – линия тока, ограничивающая количество краски

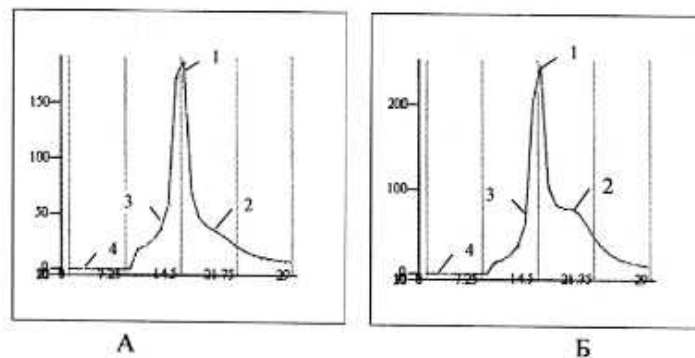


Рис. 5. Распределение давления в плоскости ракеля:  
1 – максимум давления, соответствующий краю ракеля; 2 – максимум давления, соответствующий вихрю;  
3 – падение давления в зазоре; 4 – давление на линии цилиндра

ложены пластинка, параллельная оси  $Ox$  с центром в начале координат, цилиндр радиуса  $R$  с центром в точке  $z_2$  и пара вихрей, один из которых совмещен с центром цилиндра и имеет отрицательное направление вращения, и вихрь в точке  $z_2$  с положительным направлением вращения. Поток, дойдя до кругового цилиндра, плавно огибает его, и под действием циркуляции цилиндра часть жидкости затягивается в зазор между цилиндром и пластинкой. Под действием циркуляции вихря 2 поток изгибается, но, пройдя зону воздействия, восстанавливает свою траекторию.

В реальном красочном ящике краска занимает ограниченный объем, при этом ее ограничивают цилиндр, ракель и граница с воздушной средой, так называемая свободная поверхность. Для ее моделирования поместим центр вихревой нити в точку, где предположительно находится центр циркуляционного потока при ограниченном количестве краски. Направим поступательный поток по биссектрисе угла атаки ракеля к цилиндру в направлении зазора. Увеличенный фрагмент течения при различных параметрах показано на рис. 4, где показано обтекание цилиндра 1 и пластинки 2, угол атаки которой к ци-

линдру, составляет  $45^\circ$ . На рис. 4А центр вихревой нити 3 был помещен в точку своего предполагаемого нахождения при большом количестве краски в красочном ящике. При значении циркуляции вихревой нити  $G_1 = 3,7$  на картинке появилась замкнутая линия тока 4. Так как скорость вдоль линии тока направлена по касательной к ней, то отсутствует расход жидкости через линию тока. Таким образом, можно принять линию тока 4 как границу свободной поверхности краски. Замкнутые линии тока внутри рассматриваемой области свидетельствуют о циркуляции краски, что хорошо согласуется с практическими наблюдениями. На рис. 4Б угол атаки ракеля к цилиндру остается без изменений, а вихрь расположен в точке  $z_2(-3,5; 1)$ . Такое расположение вихря соответствует малому количеству краски в красочном ящике. На рис. 4В – Г показаны картины течения при угле атаки ракеля к поверхности цилиндра, равном  $20^\circ$ . На рис. 4В линия тока 4 моделирует свободную поверхность краски при её малом количестве в красочном ящике. Такая линия тока была получена в случае расположения вихревой нити в точке  $z_2(-4; 0,4)$  и значении циркуляции  $G_1 = 1,7$ . На рис. 4Г показаны линии



тока при большом количестве краски при параметрах течения  $z_2(-2,5; 0,8)$  и  $G_1 = 3,7$ .

На рис. 5А показано распределение гидродинамического давления, рассчитанного по полученным значениям скорости, при угле атаки, равном  $45^\circ$ . Давление растет по направлению к цилиндру и в точке 1 соответствующей краю ракеля достигает своего максимального значения. В точке 2 расположен центр вихревой нити с интенсивностью равной половине циркуляции цилиндра. Кривая 3 соответствует падению давления в зазоре между ракелем и цилиндром 4. На рис. 5Б интенсивность вихря увеличена в 2 раза, что привело к увеличению давления в 2,5 раза. Такое распределение давления может не соответствовать реальному, однако позволяет провести качественный анализ зависимости давления от параметров течения.

**Направление дальнейших исследований.** Полученные зависимости позволяют строить линии тока и проводить качественную оценку течения. Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении определения деформации раковой пластинки под действием давления, возникающего в зазоре между круговым цилиндром и тонкой пластинкой. После этого можно будет приступить к определению деформации упругой покрышки дукторного цилиндра.

#### Выводы

1. С помощью конформных отображений удалось получить выражение, с помощью которого можно получить линии тока изучаемого течения.

2. Картины линий тока показали, что существует возможность подобрать режимы течения, при которых в пространстве между круговым цилиндром и пластинкой существуют замкнутые линии тока, моделирующие свободную поверхность жидкости.

3. Распределение давления в зоне течения выявило качественное совпадение расчетного давления и реального.

4. Для получения давления, соответствующего давлению в реальном течении, необходимо с помощью натурного эксперимента отыскать коэффициенты, входящие в выражения, описывающие течение краски.

5. Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении моделирования деформации раковой пластинки и упругой покрышки дукторного цилиндра.

#### Библиографический список

1. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер — М.: Мир, 1990. — Т.1. — 384 с.
2. Емцев, Б.Т., Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев. — М.: Машиностроение, 1978. — 463 с.
3. Александров, В.А. Техническая гидромеханика / В.А. Александров. — М.: А.: ОГИЗ, 1946. — 432 с.
4. Милн-Томсон, Л.М. Теоретическая гидродинамика / Л.М. Милн-Томсон. — М.: Изд-во Мир, 1964. — 178 с.
5. Литунов, С.Н. Методы расчета печатных аппаратов трафаретных машин: монография / С.Н. Литунов. — Омск: ОмГТУ, 2007. — 232 с.

**ЛИТУНОВ Сергей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

Адрес для переписки: e-mail: litunov@rambler.ru

**ТИТОВ Андрей Владимирович**, ассистент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

Статья поступила в редакцию 27.11.2009 г.

© С. Н. Литунов, А. В. Титов

## Книжная полка

Могин, Р. Г. Проектирование полиграфического производства [Текст]: учеб. для вузов по специальности 261202.65 «Технология полиграфического производства» / Р. Г. Могин; Моск. гос. ун-т печати. — М.: Изд-во МГУП, 2008. — 371, [1] с.: рис., табл. - Библиогр.: с. 367–368. — ISBN 978-5-8122-0935-3.

В учебнике изложены основы проектирования полиграфических предприятий с учетом новейших достижений отечественной и зарубежной техники и технологии полиграфического производства. Рассмотрены современные подходы к решению задач проектирования.

Особое внимание уделяется этапам производственного процесса, в результате которых получается готовая продукция, взаимосвязи количественных и качественных изменений объекта производства, взаимодействию основной и вспомогательных систем, построению материальных, энергетических и информационных потоков и критериальной оценке принимаемых решений.