

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ УПАКОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

---

УДК 655.3.02

**Н. С. Голуб, М. И. Кулак**

Белорусский государственный технологический университет

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОФСЕТНЫХ ФОРМНЫХ ПРОЦЕССОВ

Технологические процессы и оборудование можно классифицировать по определенным признакам. Надежность каждого класса технологического процесса будет различной в связи с разной сложностью выполняемых операций. Признаком, отражающим сущность процесса и определяющим его свойства, является отношение обязательных составляющих технологического процесса — инструмента и предмета обработки. В связи с этим все технологические процессы можно разделить на четыре класса: точечные, линейные, поверхностные и объемные. Что же касается оборудования полиграфии и упаковочного производства, то его нельзя однозначно отнести к тому или иному классу в полной мере.

Оценку надежности выполняемых операций для каждого класса процессов можно дать путем расчета технологического пути, который представляет собой расстояние, пройденное инструментом обработки по рабочей поверхности предмета обработки. Для каждого класса процессов технологический путь будет различным.

В статье рассмотрены формные операции для офсетных пластин. Технологический путь вычисляется для экспонирования, проявления, промывки, гуммирования, сушки, термообработки. Основные процессы в данных способах различаются по классам выполняемых операций. Расчет технологического пути для каждой операции позволит сделать вывод, какой процесс изготовления офсетных печатных форм является более надежным.

**Ключевые слова:** класс процесса, характер взаимодействия, технологический путь, экспонирование, проявление, промывка, сушка, термообработка.

**N. S. Golub, M. I. Kulak**

Belarusian State Technological University

## THEORETICAL ESTIMATION OF TECHNOLOGY OFFSET FORMING PROCESSES RELIABILITY

Technological processes and equipment can be classified according to certain criteria. The reliability of each class of the process will be different due to the different complexity of the operations performed. A sign that reflecting the essence of the process and determining its properties, is the attitude of the mandatory components of technological process i. e. tools and the object of processing. In this regard, all the technological processes can be divided into four classes: point, line, surface and volume. As for the printing equipment and packaging production, it can not be definitely referred to a particular class in full.

Reliability assessment of operations performed for each class of processes can be given by the calculation of technological process, which is the distance traveled by the tool on the working surface of the object processed. For each class of the processes technological path will be different.

The article deals with the forming operation for offset plates. Technological path is calculated for exposure, development, washing, gumming, drying, heat treatment. Key processes in these methods differ by class of operations performed. Calculation processing path for each operation will allow to choose the most reliable process of manufacturing offset printing forms.

**Key words:** process class, character interaction, technological process, exposure, development, washing, drying, heat treatment.

**Введение.** Используя различные критерии и признаки, технологические процессы полиграфического производства, можно классифицировать. Надежность каждого класса технологического процесса будет различной в связи с разной сложностью выполняемых операций. В соответствии с концепцией, предложенной академиком Кошкиным Л. Н., признаком, отражающим сущность процесса и определяющим его свойства, является отношение двух обязательных составляющих любого технологического процесса, а именно — инструмента и предмета обработки. Этот критерий классификации вследствие его общности применим ко многим процессам и позволяет разделить бесчисленное множество конкретных процессов на четыре класса в соответствии с четырьмя возможными видами пространственного отношения между инструментом и предметом обработки: точечным, линейным, поверхностным и объемным [1].

Точечное взаимодействие между инструментом и предметом обработки выражается в том, что технологический результат процесса определяется лишь действием одной «точки» инструмента на предмет обработки. Технологически эффективной является только одна точка инструмента, последовательно вступающая во взаимодействие со всеми точками обрабатываемой поверхности. Единственным общим геометрическим элементом инструмента и предметом обработки процессов I класса является только точка. Автоматы, работающие по принципу I класса, имеют сложную конструкцию, низкую стойкость инструмента, продолжительность рабочего движения велика. Все это приводит к низкой надежности оборудования, в связи с чем данный класс машин используется в узкой области производства. Чаще всего отказы у оборудования I класса связаны со сложной кинематикой строения аппарата [1].

Характерное для процессов II класса линейное взаимодействие между инструментом и предметом обработки выражается в том, что технологический результат процесса определяется действием рабочей линии инструмента. Технологически эффективными являются все точки рабочей линии, а не одна единственная рабочая «точка». Каждая из точек, лежащая на рабочей линии, последовательно взаимодействует уже не со всеми точками обрабатываемой поверхности, а лишь с точками, лежащими на траектории соответствующих рабочих точек. Каждая рабочая точка соответствует определенным множествам точек обрабатываемой поверхности. Общим геометрическим элементом инструмента и предмета обработки является уже не точка, а линия — геометрическая обра-

зующая обрабатываемой поверхности. Оборудование II класса кинематически построено проще. Стойкость инструмента и рабочих органов выше, однако надежность оборудования также не высока.

Поверхностное взаимодействие между инструментом и предметом обработки выражается в том, что результат технологического процесса определяется непосредственно действием самой рабочей поверхности. Технологически эффективными являются уже не только все точки, лежащие на определенной линии, но все точки, принадлежащие рабочей поверхности инструмента. Каждая точка рабочей поверхности вступает во взаимодействие лишь с одной, соответствующей точкой предмета обработки. Каждая рабочая точка инструмента соответствует лишь одной точке обрабатываемой поверхности. Общим геометрическим элементом предмета обработки и инструмента в процессах III класса является уже не точка и не линия, а поверхность. Для большей надежности кинематические сложные операции I и II классов почти всегда следует заменять кинематическими простыми операциями III класса. Здесь кинематика простейшая, высокая стойкость инструмента и рабочих органов, высокие стабильность и производительность.

Объемное взаимодействие между инструментом (обрабатывающей средой) и предметом обработки выражается в том, что результат процесса является результатом действия всего объема обрабатывающей среды на предмет обработки. Технологически эффективными являются все точки, заключенные в данном объеме обрабатывающей среды. Каждая точка обрабатывающей среды соответствует любой точке обрабатываемого предмета. Все точки рабочего объема технологически эффективны и равноценны. Оборудование, относящееся к IV классу, также кинематически построено просто и имеет большую стабильность, однако в производстве используется реже, чем оборудование других классов [1].

Характер пространственного взаимодействия между инструментом и предметом обработки является качественным критерием технологических процессов, т. е. различие основных свойств технологических процессов, а прежде всего свойств, существенных для выполнения этих процессов посредством машин, полностью определяется значениями основного критерия.

Оценку надежности выполняемых операций для каждого класса процессов можно дать, определив технологический путь  $S$ , представляющий собой расстояние, пройденное инструментом обработки по рабочей поверхности предмета обработки.

В статье рассмотрены формные операции для пластин  $42 \times 52$  см и  $140 \times 180$  см. Технологический путь вычисляется для экспонирования, проявления, промывки, гуммирования, сушки, термообработки. В офсетной печати формы на сегодняшний день изготавливают двумя самыми распространенными способами, а именно — фотомеханическим и цифровым. Основные процессы в данных способах различаются по классам выполняемых операций.

**Основная часть.** Скорость экспонирования зависит от мощности ламп и расстояния до пластины от лампы, но больше всего от механизма фотолито галогенида серебра в фотоэмульсии. Согласно современным представлениям, фотохимический процесс можно разделить на три этапа: начальный акт поглощения света; первичные реакции, вызываемые продуктами начального акта; вторичные реакции, вызываемые продуктами первичных реакций. Начальный акт поглощения кванта света вызывает переход электрона из валентной зоны в зону проводимости кристалла галогенида серебра. Скорость превращений определяется подвижностью междоузельного иона серебра (первичные и вторичные реакции), которая равна подвижности иона в водном растворе. Подвижность электрона в зоне проводимости в 105 раз, а подвижность дырки — в 103 раз больше подвижности иона в водном растворе. Поэтому первичные процессы протекают быстрее, чем вторичные [2].

Скорость экспонирования определяется скоростью накопления серебра. Скорость накопления серебра как функция экспозиции имеет максимум [2]. На предприятиях среднее время освещения при фотомеханическом способе обработки составляет  $t_{\text{осв}} = 180$  с. По данным [2], для  $t_{\text{осв}} = 180$  с скорость накопления серебра составит  $v_{\text{н}} = 2 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>·с. Поверхностная плотность накопленного серебра составит

$$q_S = v_{\text{н}} t_{\text{осв}} = 180 \cdot 2 \cdot 10^{-9} = 3,600 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^2. \quad (1)$$

Объемная плотность накопленного серебра определяется по формуле

$$q_V = \frac{q_S}{S_3}, \quad (2)$$

где  $S_3$  — технологический путь для процессов III класса; значение плотности серебра  $q_V = 10,5$  г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, технологический путь при экспонировании фотомеханическим способом составит

$$S_3 = \frac{q_V}{q_S} = \frac{v_{\text{н}} t_{\text{осв}}}{q_V} = \frac{3,600 \cdot 10^{-7}}{10,5} = 3,430 \cdot 10^{-10} \text{ м}. \quad (3)$$

Проявления, промывка и гуммирование в фотомеханическом способе происходят по II классу. Процесс проявления длится до 2 мин, промывки — до 1 мин, гуммирования — до 1,5 мин. Скорость движения пластины в проявочной машине 0,7–2,0 м/мин (для расчетов принимали 1 м/мин = 0,016 м/с). Современные процессоры способны проявлять пластины за 30 с, промывка осуществляется за 15 с, гуммирование занимает до 1 мин. Таким образом, технологический путь составит: для проявления  $S_2 = 0,490$  м, для промывки  $S_2 = 0,240$  м, для гуммирования  $S_2 = 0,960$  м. В данном случае технологический путь не будет зависеть от формата пластин, а будет определяться техническими характеристиками процессора.

Если проявление проходит по VI классу, то для нахождения скорости процесса необходимо найти связь оптической плотности с концентрацией серебра, которая выражается формулой

$$D_p = K c_S, \quad (4)$$

где  $K$  — постоянная, называемая кроющей способностью серебра, находится через соотношение  $K = 1 / P$ , где  $P$  — фотографический эквивалент, он равен  $[3] 4 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>2</sup>;  $c_s$  — поверхностная концентрация серебра, находится по формуле

$$c_S = \frac{D_p}{K} = D_p P. \quad (5)$$

Тогда технологический путь  $S_4$ , если принять оптическую плотность равной 3, будет

$$S_4 = \frac{c_s}{q_v} = \frac{D_p P}{q_v} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{10,5} = 1,140 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (6)$$

Сушка в допечатных процессах относится к IV классу. Масса испарившейся воды в единицу времени с 1 м<sup>2</sup> площади [4]

$$\frac{W}{\tau F} = c \frac{MDL}{RT_n} (H - h) = G, \quad (7)$$

где  $c = k \text{ Re}^n$ , коэффициент испарения;  $M$  — молекулярная масса испаряемой жидкости ( $\text{H}_2\text{O} = 18,016 \cdot 10^{-3}$  кг/Моль);  $D$  — коэффициент диффузии для системы воздух – водяной пар, м<sup>2</sup>/ч;  $L$  — ширина поверхности испарения в направлении, перпендикулярном направлению движения воздуха, м;  $R$  — газовая постоянная, Дж/моль·К;  $T_n = 0,5(T_{\text{н.ж}} + T_c)$ , температуры жидкости и окружающего воздуха соответственно, К;  $H$  — давление насыщенного пара при температуре воды, Па;  $h$  — парциальное давление пара при параметрах воздуха, Па.

Формула для определения числа Рейнольдса

$$Re = \frac{ul}{n}, \quad (8)$$

где  $u$  — скорость движения воздуха, м/с (скорость промышленных вентиляторов 2–5 м/с);  $l$  — размер поверхности испарения по направлению потока воздуха, м;  $n$  — кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с ( $n_{\text{воз}} = 0,014 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с).

Коэффициент диффузии находится по формуле

$$D = D_0 \left( \frac{T_n}{273,15} \right)^{1,89} \frac{B_0}{B}, \quad (9)$$

где  $D_0 = 0,0754$  м<sup>2</sup>/ч, водяной пар при нормальных условиях;  $B_0 = 101,325$  кПа — барометрическое давление;  $B$  — давление системы, кПа.

Найдем числа Рейнольдса для пластин первого формата (42×52 см) и пластин второго формата (140×180 см):

$$Re_1 = \frac{5 \cdot 0,520}{0,014 \cdot 10^{-3}} = 185\,714;$$

$$Re_2 = \frac{5 \cdot 1,800}{0,014 \cdot 10^{-3}} = 642\,857.$$

Если  $Re$  более 20 000, то справедливо выражение

$$c = 0,85 Re^{0,76}. \quad (10)$$

Тогда

$$c_1 = 0,85 \cdot 185\,714^{0,76} = 8585;$$

$$c_2 = 0,85 \cdot 642\,857^{0,76} = 22\,059.$$

Приняв, что давление в аппарате равно атмосферному, найдем коэффициент диффузии:

$$D = 0,0754 \cdot \left( \frac{294,500}{273,150} \right)^{1,89} \cdot \frac{0,1013}{0,1013} = 0,087 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

В специальных таблицах находятся значения давления насыщенного пара при различных температурах [5]. Давление насыщенного пара при температуре воды промывки 23°C равно  $H = 2,810$  кПа. Парциальное давление пара при параметрах воздуха в помещении находится по формуле

$$h = B_0 \frac{d}{622 + d}, \quad (11)$$

где  $d$  — влагосодержание, которое при 20°C равняется 14,7 г/кг с. в.

$$h = 101,325 \frac{14,7}{622 + 14,7} = 2,339 \text{ кПа}.$$

Найдем массу испарившейся воды для пластин первого формата (42×52 см) и пластин второго формата (140×180 см) соответственно:

$$G_1 = 8585 \frac{18,016 \cdot 10^{-3} \cdot 0,087 \cdot 0,420}{8,314 \cdot 294,500} \times$$

$$\times (2,810 - 2,339) = 0,109 \cdot 10^{-2} \text{ кг/ч} \cdot \text{м}^2;$$

$$G_2 = 22059 \frac{18,016 \cdot 10^{-3} \cdot 0,087 \cdot 1,400}{8,314 \cdot 294,500} \times$$

$$\times (2,810 - 2,339) = 0,931 \cdot 10^{-2} \text{ кг/ч} \cdot \text{м}^2.$$

Массу воды  $W$  можно записать как

$$W = V \rho_{\text{пар}} = S_4 F \rho_{\text{пар}}, \quad (12)$$

где  $F$  — площадь пластины, м;  $\rho_{\text{пар}}$  — плотность пара (абсолютная влажность воздуха), при 20°C и относительной влажности 60 % составит  $10,4 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>.

Формулу (7) с учетом (12) можно записать

$$\frac{S_4 F \rho_{\text{пар}}}{\tau F} = G. \quad (13)$$

Тогда технологический путь для сушки пластины

$$S_4 = \frac{G \tau}{\rho_{\text{пар}}}. \quad (14)$$

Среднее время сушки на производстве по IV классу составляет около 2 мин. Технологический путь  $S_4$  операции сушки для пластин формата 42×52 см и 140×180 составит

$$S_{41} = \frac{0,109 \cdot 10^{-2} \cdot 0,033}{10,4 \cdot 10^{-3}} = 0,346 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$S_{42} = \frac{0,931 \cdot 10^{-2} \cdot 0,033}{10,4 \cdot 10^{-3}} = 2,956 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Если рассмотреть цифровой способ изготовления форм, то отличие будет в процессе экспонирования и термообработки. Экспонирование в данном случае осуществляется по I классу. Размер пятна в современных СтР устройствах 5–25 мкм. В современных экспонирующих модулях СтР существуют устройства для формирования одновременно более 200 параллельных лучей. Если размер записывающего пятна будет 18 мкм и устройство формирует 512 лучей, то технологический путь экспонирования составит  $S_1 = 23,698$  м для первой пластины и  $S_1 = 273,438$  м — для второй. В данном случае технологический путь будет зависеть от размера экспонирующего пятна и формата пластины.

Расчетные значения технологического пути

Класс	Экспонирование	Проявление	Промывка	Гуммирование	Сушка	Термообработка
I	23,698 273,438	—	—	—	—	—
II	—	0,490	0,240	0,960	—	—
III	$3,430 \cdot 10^{-10}$	—	—	—	6,000	1,500
IV	—	$1,140 \cdot 10^{-6}$	—	—	$0,346 \cdot 10^{-2}$ $2,956 \cdot 10^{-2}$	—

В СтР агрегатах применяются форсированные воздушные сушки по III классу, работающие при температуре 80°C. В таких сушилках пластина движется со скоростью 1,6–2,5 м/мин 1–5 мин. Тогда технологический путь S3 составит 6 м.

Термообработку по III классу осуществляют на поточных транспортерах, движущихся со скоростью 0,4–0,6 м/мин. Время термообработки составляет в среднем 3 мин. Технологический путь S3 для пластин будет 1,5 м. В данном случае значение формата пластины не влияет на расчеты, учитывается только ширина полосы загрузки пластин в транспортере. При термообработке скорость затвердевания полимера зависит от скорости испарения растворителя с поверхности и скорости его диффузии. Перед термообработкой наносится специальный защитный коллоид типа «экран». Термообработка по IV классу используется редко в связи с печатью на сегодняшний день заказов до 1 млн экземпляров.

Все остальные операции для изготовления форм цифровым способом схожи с фотохимическими, расчеты для которых приведены выше.

В таблице представлены значения технологического пути для всех классов процессов.

**Вывод.** Технологический путь должен уменьшаться от I к IV классу процессов, а интенсивность отказов уменьшается с уменьшением технологического пути обработки предмета [6]. Так, в экспонировании по I классу технологический путь больше чем по III классу. Проявление имеет больший технологический путь по II классу, а если его проводить по IV классу, то технологический путь значительно уменьшается. Такую же закономерность можно проследить в операции сушки. По таблице можно сделать вывод, что надежность оборудования и операций выше для IV класса процессов и будет уменьшаться в сторону I класса. Для надежного изготовления печатных форм выгоднее устанавливать допечатное оборудование с экспонированием и сушкой, работающими по IV классу.

### Литература

1. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1986. 354 с.
2. Поддымов В. П. Термодинамика и кинетика фотографического процесса. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 111 с.
3. Шашлов Б. А. Теория фотографических процессов. М.: МГАП «Мир книги», 1993. 311 с.
4. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
5. Справочные таблицы: химический блок [Электронный ресурс]. Москва, 2016. Режим доступа: <http://www.fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html>. Дата доступа: 13.03.2016.
6. Голуб Н. С., Кулак М. И. Класс технологического процесса как основа оценки надежности выполнения технологических операций: 80-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием): Издательское дело и полиграфия: тезисы 80-й науч.-техн. конференции. Минск, БГТУ, 2016. С. 46.

### References

1. Koshkin L. N. *Rotornye i rotorno-konveyernye linii* [The rotor and rotor-conveyor lines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 354 p.
2. Poddymov V. P. *Termodinamika i kinetika fotograficheskogo protsesssa* [Thermodynamics and kinetics of the photographic process]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1989. 111 p.
3. Shashlov B. A. *Teoriya fotograficheskikh protsessov* [The theory of the photographic process]. Moscow, MGAP «Mir knigi» Publ., 1993. 311 p.
4. Lykov A. V. *Teoriya sushki* [Drying theory]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p.

5. *Spravochnyye tablitsy: khimicheskiy blok* [Reference tables: chemical unit]. Available at: <http://www.fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html> (accessed 13.03.2016).

6. Golub N. S., Kulak M. I. [The class of the process as a basis for evaluating the reliability of technological operations]. *80-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem) («Izdatel'skoye delo i poligrafiya»)* [Abstracts of the 80th Scientific Conference of the faculty, researchers and graduate students (with international participation) ("Publishing and printing")]. Minsk, BGTU, 2016, p. 46 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Голуб Надежда Сергеевна** — аспирант кафедры полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [golubok.358-01@mail.ru](mailto:golubok.358-01@mail.ru)

**Кулак Михаил Иосифович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [kulak-mi@tut.by](mailto:kulak-mi@tut.by)

#### Information about the authors

**Golub Nadezhda Sergeevna** — PhD student, the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [golubok.358-01@mail.ru](mailto:golubok.358-01@mail.ru)

**Kulak Mikhail Iosifovich** — DSc (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [kulak-mi@tut.by](mailto:kulak-mi@tut.by)

*Поступила 20.05.2016*