

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 69.003 : 658.387.018 : 693.25

А.П. СВИНЦОВ, АББАС А. АБД НУР

### ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ КИРПИЧНЫХ ЗДАНИЙ ТАУНХАУС\*

Вероятностное представление реализации строительных технологических процессов предусматривает их рассмотрение в аспекте случайных процессов. В настоящее время моделирование индикаторов состояния и осуществления строительных технологических процессов основано на детерминированных методах. Это не обеспечивает адекватное их моделирование. Целью исследования является разработка вероятностной математической модели оценки надежности по производительности труда при возведении кирпичных зданий типа «таунхаус». В процессе исследования выявлены причинно-следственные связи формирования производительности труда бригад каменщиков. В результате исследования разработана вероятностная математическая модель оценки надежности организации работ по кирпичной кладке стен зданий типа «таунхаус» в г. Аль-Мутанна (Ирак). Применение вероятностной математической модели позволяет давать количественную оценку качественным характеристикам организации кирпичной кладки при возведении стен зданий типа «таунхаус». Количественная оценка качественных параметров реализации технологических процессов кирпичной кладки обусловлена важностью практических задач современного строительства.

**Ключевые слова:** строительство, кирпичная кладка, надежность, производительность труда.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-735-3-76-92

**1. Введение.** Жилищное строительство остается актуальным направлением. В условиях интенсивного развития малоэтажного строительства, в том числе блокированной застройки, возникает необходимость поиска оптимальных решений, обеспечивающих соответствие территорий экологическим, социальным и эстетическим требованиям, в сочетании с доступностью и экономической привлекательностью. Из многообразия построек особый интерес представляют «таунхаусы», спрос на которые ежегодно повышается. В зависимости от применяемых материалов несущих и ограждающих конструкций

\* Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100».

© Свинцов А.П., Аббас А. Абд Нур, 2020

используются каркасные и стеновые конструктивные схемы с применением кирпича, сборных и монолитных конструкций, энергоэффективных ограждающих материалов. Средняя производительность труда при ручных работах составляла 1,2–2,0 м<sup>3</sup> кладки в смену [1]. Интеграция проектных мероприятий и увеличение инноваций играют важную роль в повышении эффективности проекта в достижении целей стоимости, графика, безопасности, качества и устойчивости [2]. Производительность труда в строительстве исследуется по различным направлениям: методы и технологии для улучшения производительности труда; тенденции и сравнения производительности; факторы, влияющие на производительность; моделирование и оценка производительности и т.п. [3–5]. В [6] получены и проанализированы затраты на отказ в качестве, выраженные в форме затрат на несоответствия. На производительность труда в бригадах оказывают влияние виды деятельности и численный состав [7]. Критические факторы, влияющие на производительность строительства, были связаны с материалами, инструментами, переделкой, оборудованием, наличием грузовых автомобилей, мотивационной динамикой работников и др. [8]. Исследование [9] посвящено моделированию взаимосвязей взаимодействия между ключевыми факторами, влияющими на производительность. Правильное управление ресурсами в строительстве может привести к значительной экономии времени и затрат. Представлены факторы, влияющие на производительность труда в строительстве и способы ее повышения [10]. Установлено, что непосредственно в каменной кладке занятый труд испытывал большее количество сбоев и постоянно находился на сверхурочном графике [11]. Анализ показателей надежности строительных технологических систем показывает, что одним из наиболее эффективных методов ее повышения является организация ритмичной работы, исключение простоев и непредвиденных отказов [12]. Сложная взаимосвязанная структура различных факторов, влияющих на производительность труда, моделируется с использованием системно-динамического подхода [13].

Анализ результатов исследований многочисленных специалистов показывает, что вопросам деятельности строительного сектора посвящены многие исследования. Значительным резервом повышения эффективности строительства является повышение надежности реализации строительных технологических процессов.

Цель исследования – разработка вероятностной математической модели оценки надежности реализации технологических процессов при возведении жилых комплексов типа «таунхаус» (на примере провинции Мутанна на юге Ирака) с использованием кирпичной кладки.

**2. Материалы и методы исследования.** Таунхаус является одним из наиболее развивающихся направлений жилищного строительства в Ираке. Таунхаусы строят из кирпича, бетонных или пенобетонных блоков (рис. 1).

В рамках исследования выполнено ежедневное наблюдение на пяти строительных площадках в течение восьми рабочих недель. На двух строительных площадках производство организовано по системе «тройка». На трех строительных площадках производство организовано по системе «четверка». Продолжительность рабочей смены 8 ч. Рабочая смена разделена на две части с учетом климатических условий Ирака.



Рис. 1. Таунхаус в Ираке

Ординарный рабочий день бригады каменщиков состоит из следующих периодов: основное время работы, подготовительные работы, заключительные работы, паузы, технологические остановки, большой перерыв – сиеста. Продолжительность сверхурочной работы не превышает 3 ч и обычно равна 2 ч. Оплата труда принята почасовая с нормой выработки в среднем 900–1200 шт. на бригаду в смену. Задание по производительности труда в сверхурочное время – 300 шт. кирпичной кладки. Двухэтажный жилой дом типа «таунхаус» состоит из четырех секций. Ведущим технологическим процессом является кирпичная кладка стен и перегородок. На образованном производственном пространстве размещены бригады каменщиков (рис. 2).



Рис. 2. Возведение таунхаусов из кирпича (бригада каменщиков на объекте)

В исследовании использован вероятностный метод оценки организации кирпичной кладки стен зданий типа «таунхаус». Одним из важнейших аспектов организации производства строительных работ является выработка продукции. В качестве параметров производительности труда в настоящем исследовании использованы индикаторы: производственного задания по производительности, номинальной и удельной производительности.

Сравнение полученных статистических выборок выполнено методом ранговой корреляции. В качестве нулевой гипотезы принято, что выборки независимы между собой и однородны. Для анализа выборок использованы критерии Ф. Уилкоксона и Ч. Спирмена [14, 15]. Использование представленной методики для анализа фактического состояния организации производства работ по возведению жилых зданий типа «таунхаус» из кирпича

позволило выполнить оценку его надежности с обеспеченностью не ниже  $\gamma = 0,05$ .

Оценка достоверности результатов выполнена методом доверительных интервалов. При исследовании к анализу приняты данные о дневной производительности труда в ординарный рабочий день, производительности труда в сверхурочное время, непредвиденных остановках производственного процесса, приводящих к остановке соответствующего потока.

**3. Результаты исследования и их обсуждение.** Кирпичная кладка является строительным технологическим процессом с большими затратами ручного труда. Рабочие операции кирпичной кладки почти не поддаются механизации. В процессе исследования выявлены остановки производства и потери рабочего времени, включая вынужденные простои. На рис. 3 представлено распределение потерь рабочего времени.

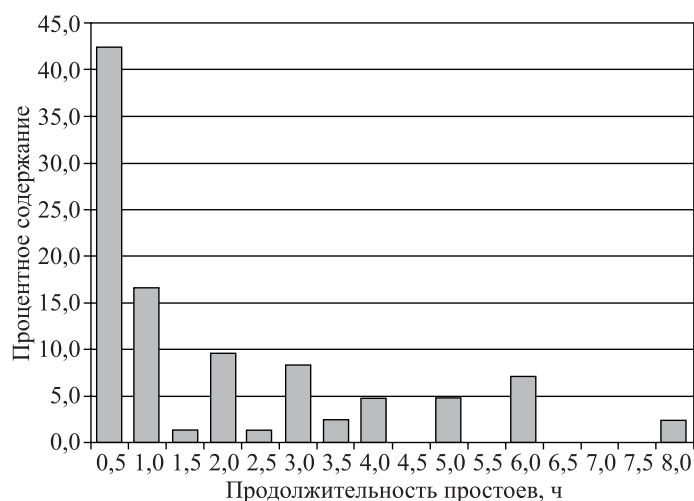


Рис. 3. Распределение потерь рабочего времени

Установлено, что наибольшее количество остановок производства приходится на относительно короткий промежуток времени от 0,5 ч (42,4 %) до одного часа (16,5 %). Простои продолжительностью 2, 3 и 6 ч составляют соответственно 9,4, 8,2 и 7,1 %. Простои продолжительностью 4, 5 и 8 ч зафиксированы значительно реже соответственно 4,7, 4,7 и 2,4 %.

В процессе мониторинга функционирования организации строительных работ на исследуемых объектах установлено, что критическим простоем можно считать остановку производства на 4 ч и более. Эти значения приняты как критические потери времени. Остановки производства на 2–3 ч считались значительными, но не критическими. Выполнение задания по производительности осуществлялось за счет увеличения интенсивности труда. Простои продолжительностью от 0,5 ч до одного часа признаны незначительными. Причины простоев и перерывов в работе носят случайный характер и, как правило, не могут быть учтены в проектах производства работ.

Одной из причин временной остановки производства является устранение дефектов. В процессе производства кирпичной кладки возникают дефекты: нарушения перевязки рядов, образование пустых швов, отклонение рядов

от прямой линии, отклонение по вертикали и др. Устранение дефектов требует дополнительных затрат труда и времени.

Производительность труда бригады каменщиков зависит не только от ритмичности работы, но и от организации производственного процесса. Оплата труда предусматривает выполнение кирпичной кладки в количестве 900 шт. в течение ординарного рабочего дня продолжительностью 8 ч для бригады с организационной формой типа «тройка» и 1200 шт. для бригады с организационной формой типа «четверка». Однако на исследованных строительных площадках эта норма, как правило, не выполняется. В процессе наблюдений установлено, что кирпичная кладка производится весьма неравномерно. Неравномерность производства работ отмечена не только в отдельные дни в течение недели, но и по неделям в течение месяца. На рис. 4

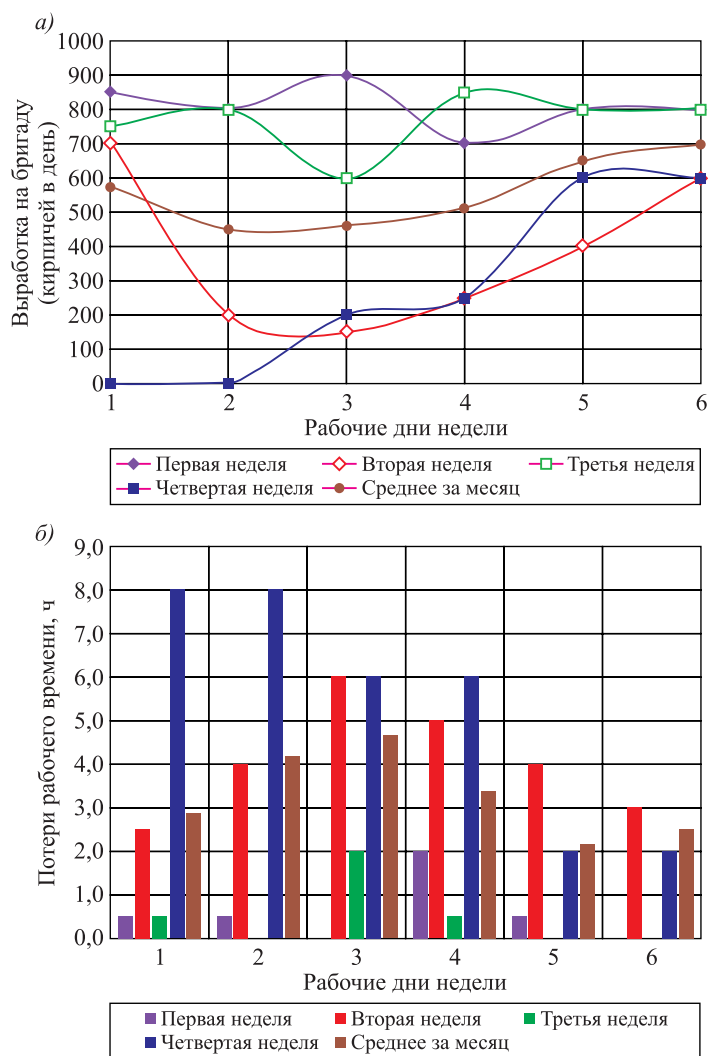


Рис. 4. Неравномерность производства работ в бригаде типа «тройка»

а – изменения выработки; б – распределение потерь рабочего времени

представлены графики изменения выработки и диаграммы потерь рабочего времени в бригаде типа «тройка».

Совместный анализ диаграмм и графиков позволил выявить причинно-следственную связь между выработкой и ритмичностью работы бригады каменщиков. Установлено, что потери рабочего времени напрямую влияют на величину выработки. Наиболее производительной за весь период наблюдений является первая неделя. Выработка изменяется от 700 до 900 кирпичей в день при среднем значении 810 кирпичей в день. Несмотря на относительно небольшую потерю времени, составляющую в среднем 0,9 ч в день, выработка ниже нормы в среднем на 10,2 %. Наименее производительной является четвертая неделя со средней выработкой 275 кирпичей в день. Это на 69,4 % ниже нормы. Потери рабочего времени изменяются от 2 до 8 ч в день при среднем за неделю значении 5,3 ч.

Анализ количества кирпичной кладки в течение месяца показывает, что выработка изменяется от 450 до 700 кирпичей в день при среднем значении 560 кирпичей в день. Это на 37,9 % ниже нормы по условиям оплаты труда.

Производство работ во второй бригаде типа «тройка» также не ритмично, как и в первой бригаде. Дневная выработка в среднем за месяц изменяется от 390 до 830 кирпичей при среднем значении 660 кирпичей в день. Это на 26,9 % меньше, чем предусмотрено условиями оплаты труда.

В результате анализа данных методами ранговой корреляции установлено, что показатели выработки в бригадах с организационной формой типа «тройка» взаимно независимы и однородны. Это позволяет считать, что особенности причинно-следственных связей формирования выработки для бригад одинаковы.

В результате наблюдения и систематизации данных установлено, что выработка в бригадах типа «четверка» формируется так же неравномерно, как и в бригадах типа «тройка». На рис. 5 представлены графики изменения выработки и диаграммы потерь рабочего времени в бригаде типа «четверка».

Для бригады типа «четверка» первая неделя является наиболее результативной. Выработка характеризуется большой неравномерностью как по рабочим дням, так и по рабочим неделям. Выработка изменяется от 1000 до 1100 кирпичей в день при среднем значении 1083 кирпича в день. Это на 9,7 % ниже нормы по условиям оплаты труда. В другие недели объемы выполненной кладки изменяются от 600 до 1200 кирпичей в день. Отставание от нормы выработки изменяется от 15,3 до 45,8 %.

Выработка в двух других бригадах типа «четверка» характеризуется значительной неравномерностью и составляет в среднем 950 кирпичей за смену. Это на 20,8 % ниже нормы.

Для сравнения эффективности производства работ бригадами типа «тройка» и «четверка» выполнен анализ выработки на одного рабочего. На рис. 6 представлены распределения производительности труда на одного рабочего в ординарный рабочий день.

Анализ данных показывает, что в исследованных условиях организации производства производительность труда у бригад типа «тройка» ниже в среднем на 13,8 %, чем у бригад типа «четверка». Однако оба типа организации бригад дневное задание не выполняют.

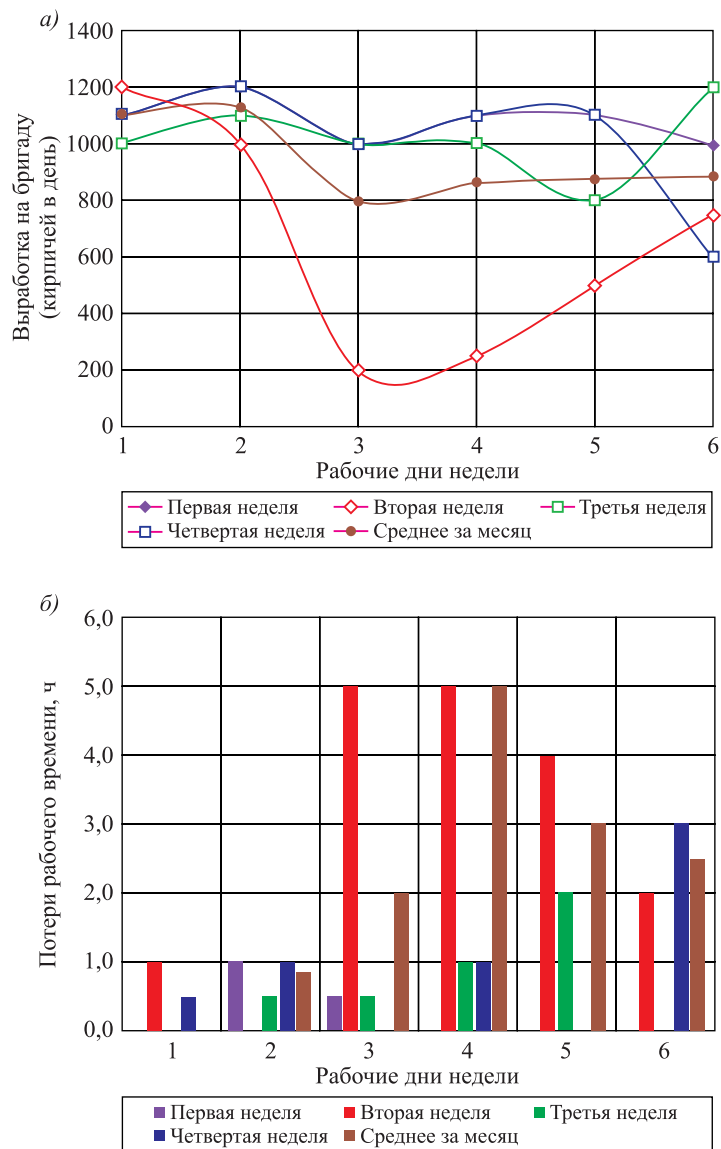


Рис. 5. Изменение выработки и потерь рабочего времени в бригаде типа «четверка»

а – изменение выработки; б – распределение потерь рабочего времени

Для сравнения выработки бригад с организационными формами производства типа «тройка» и «четверка» выполнен ранговый корреляционный анализ их показателей. На основе критерия Спирмена и критерия Вилкоксона установлено, что показатели выработки статистически независимы и однородны. Это позволяет считать, что причинно-следственные связи формирования выработки исследованных бригад каменщиков зависят от внешних факторов.

Несоответствие фактической выработки показателям плановых заданий – следствие воздействия внутренних и внешних факторов. Одним из наиболее существенных внутренних факторов является квалификация производственного персонала. Квалификация каменщиков обуславливает ис-

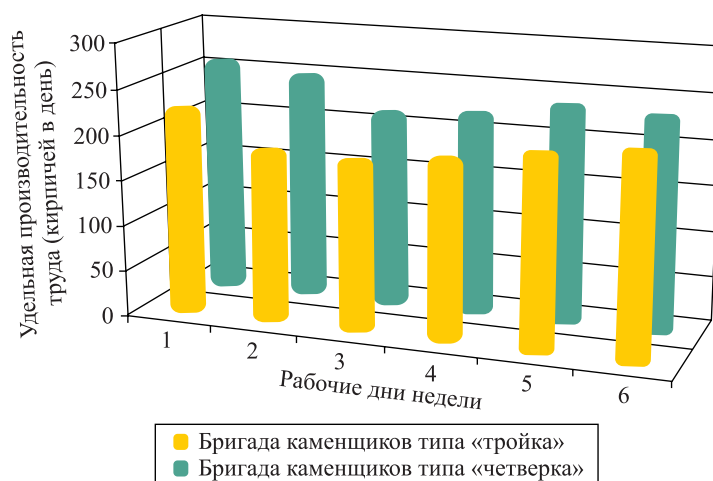


Рис. 6. Распределение производительности труда на одного рабочего в бригадах каменщиков

пользование рабочего времени на устранение образовавшихся дефектов. Это не относится к производственному периоду и считается потерей рабочего времени. Внешним по отношению к производственному персоналу фактором является неритмичность поставок материала. Значительные потери времени связаны с отсутствием материалов.

Для компенсации потерь времени и выполнения графика производства работ, чтобы не задерживать реализацию последующих процессов, инженерный персонал строительной площадки использует сверхурочную работу. Сверхурочная работа длится обычно 2–3 ч и оплачивается на 60–70 % больше, чем в ординарный рабочий день. При этом производительность труда в сверхурочное время на 10–15 % ниже, чем в ординарный рабочий день. Это объясняется усталостью рабочей силы. Сверхурочная работа представляет собой ресурсную проблему с неспособностью выполнять работу ускоренными темпами. Потери производительности труда от вынужденных простоев в ординарные рабочие дни могут достигать 26 %. Для реализации современных строительных технологических систем это очень большое снижение производительности труда. На рис. 7 представлено распределение производительности труда в периоды сверхурочной работы. Сверхурочная работа может служить резервом трудовых ресурсов при соответствующем экономическом обосновании.

Анализ данных показывает, что производительность труда бригады типа «троечка» ниже, чем у бригады типа «четверка». Разница составляет в среднем 23,1 %. Это можно объяснить большей усталостью рабочих бригады типа «троечка», накопившейся в течение ординарного рабочего дня. Производительность труда в сверхурочное время для обоих типов организации бригад ниже на 15–17 %, чем в ординарное рабочее время. Это соответствует результатам других авторов [11].

**4. Математическая модель оценки надежности организации работ по кирпичной кладке стен зданий типа «таунхаус».** Технологическая система кирпичной кладки стен зданий типа «таунхаус» в условиях Ирака имеет свои особенности. Кладка кирпичных стен является очень трудоемким процессом



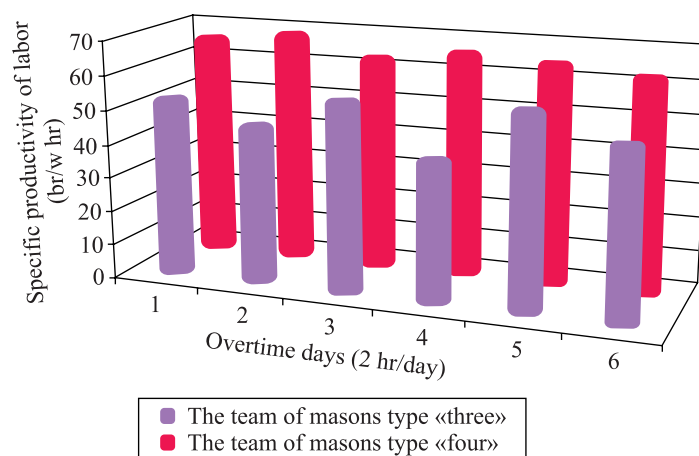


Рис. 7. Производительность труда в период сверхурочной работы

с использованием большого количества ручного труда. В связи с этим состояния технологической системы не поддаются строгому математическому моделированию на основе детерминированных методов. Неучет вероятностного, стохастического характера функционирования технологической системы приводит к неадекватности и ненадежности многих технологических и экономических показателей. Прогнозирование надежности организации работ кирпичной кладки объектов массового строительства осложняется тем, что характеристики производства работ индивидуальны для каждого объекта. Метод прогнозирования безотказности, основанный на вероятностной математической модели, позволяет давать объективную оценку состояния организации производства работ.

Применительно к условиям возведения жилого комплекса типа «таунхаус» математическое описание Марковского случайного процесса с дискретными состояниями работы и простоя, а также с непрерывным временем заключается в описании возможных состояний системы. Строительная технологическая система может находиться в следующих состояниях:

- а) бригада каменщиков выполняет работы в ординарном режиме без вынужденных простоев в течение рабочего дня длительностью восемь часов;
- б) бригада каменщиков работает с вынужденными простоями и потерей рабочего времени; образование вынужденных простоев представляет собой пуассоновский процесс с интенсивностью  $\lambda$ ;
- в) бригада каменщиков выполняет работы сверхурочно с интенсивностью  $\mu$ .

Материалы по технологической схеме поступают в возводимые конструкции. При отсутствии материалов производство работ находится в состоянии вынужденного простоя. Состояние производства работ в момент времени  $t$  может быть представлено вероятностной математической моделью. Обозначим вероятность нахождения производства работ в соответствующих состояниях:

- $P_0$  – вероятность ритмичной ординарной работы;
- $P_1$  – вероятность отказа и вынужденного простоя;

$P_2$  – вероятность сверхурочной работы для устранения потерь производства работ из-за простоев.

Реализация технологических процессов во многих случаях может рассматриваться как случайный процесс. В связи с этим система может иметь математическое описание в виде Марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Все переходы системы из состояния  $S_i$  в  $S_j$  происходят под воздействием простых потоков событий с интенсивностями  $\lambda_{ij}$  ( $i, j = 0, 1, 2$ ). Переходы из одного состояния в другое приняты простейшими. Это позволяет рассматривать возникающие обстоятельства как случайные события. Описание организации производства работ может быть выполнено на основе анализа графа (рис. 8).

Функционирование производства работ можно представить в виде следующих состояний:

$S_0$  – производство работ имеет ритмичный характер без вынужденных перерывов (отказов);

$S_1$  – вынужденный перерыв в работе бригады каменщиков;

$S_2$  – организована сверхурочная работа бригады.

Вероятность  $i$ -го состояния – это вероятность  $P_i(t)$  того, что в момент  $t$  система будет находиться в состоянии  $S_0$ . Для любого момента времени  $t$  сумма вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1. \quad (1)$$

Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний имеет вид:

$$\begin{cases} P'_0 = -2\lambda P_0 + \mu P_1 + \mu P_2, \\ P'_1 = -\lambda P_1 + \lambda P_0 + \mu P_2, \\ P'_2 = -2\mu P_2. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом того, что предельные вероятности постоянны, заменяя в уравнениях (2) производные нулевыми значениями, получим систему алгебраических уравнений, описывающих стационарный режим:

$$\begin{cases} 2\lambda P_0 = \mu P_1 + \mu P_2, \\ \lambda P_1 = \lambda P_0 + \mu P_2, \\ 2\mu P_2 = \lambda P_0. \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3) получаем:

$$P_1 = \frac{3\lambda}{2\mu} P_0; \quad P_2 = \frac{\lambda}{2\mu} P_0. \quad (4)$$

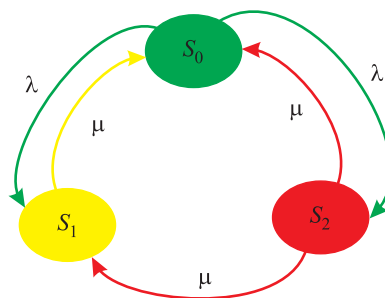


Рис. 8. Граф состояний производства кирпичной кладки таунхаусов

С учетом (1) получаем:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{\mu}}. \quad (5)$$

Уравнения (2)–(3) позволяют представить аналитическое описание дискретно распределенных состояний организации производства работ при непрерывном времени  $t$ . При оценке интенсивности отказов  $\lambda(t)$  принято допущение, что существенной потерей рабочего времени или отказом организации производства работ является простоя в течение 4 ч и более. Наблюдение осуществлялось за строительными площадками в количестве  $N = 5$  в течение времени  $\Delta t = 48$  рабочих дней. Количество отказов составляет  $n(\Delta t) = 16$ . Для реализации строительных технологических процессов характерен длительный период функционирования. В связи с этим в диапазоне времени  $\Delta t$  принимаем  $\lambda = \text{const}$ . Тогда получаем, что  $\lambda = 0,067$  дней<sup>-1</sup>.

Строительные технологии относятся к восстанавливаемым системам. По данным ежедневных наблюдений общее количество дней сверхурочной работы  $m = 83$ . Организация строительного производства функционирует относительно длительное время на промежутке  $\Delta t \mu = \text{const}$ . Тогда интенсивность восстановления технологического процесса  $\mu(t) = 0,346$  дней<sup>-1</sup>.

Предельные вероятности  $P_0, P_1, P_2$  состояний производства определяются по формулам (4) и (5):  $P_0 = 0,72$ ;  $P_1 = 0,21$ ;  $P_2 = 0,07$ .

Анализ полученных данных с использованием предложенной вероятностной математической модели оценки надежности организации производства работ показывает, что формальное представление практически устраняет влияние субъективных факторов на оценку. Полученные данные показывают, что только 72 % рабочего времени используется на производство строительной продукции. При этом 28 % рабочего времени относится к простоям и сверхурочной работе.

Исследованием установлено, что ритмичность производства в бригадах не одинакова. В табл. 1 представлены значения интенсивностей отказов и интенсивностей восстановления для различных бригад.

Определение показателей надежности производства работ позволяет давать оценку риска снижения выработки и оценку экономического эффекта, обусловленного данным риском. При этом нормирование производительности

Таблица 1. Интенсивности отказов и восстановления Марковских процессов бригад у каменщиков в г. Аль-Мутанна

Площадка	Интенсивность отказов (день <sup>-1</sup> )		Интенсивность восстановления (день <sup>-1</sup> )	
	$\lambda$	Значение	$\mu$	Значение
I бригада «тройка»	$\lambda_{13}$	0,17	$\mu_{13}$	0,38
II бригада «тройка»	$\lambda_{23}$	0,04	$\mu_{23}$	0,38
I бригада «четверка»	$\lambda_{14}$	0,06	$\mu_{14}$	0,75
II бригада «четверка»	$\lambda_{24}$	0,08	$\mu_{24}$	0,31
III бригада «четверка»	$\lambda_{34}$	0,06	$\mu_{34}$	0,29

сти труда осуществляется под влиянием следующих основных факторов: типа объекта, организационной структуры производственной бригады, вероятностных процессов реализации технологии производства работ.

Тип объекта обуславливает требуемое качество кирпичной кладки (под штукатурку, с расшивкой и др.) и нормирование производительности труда. Для условий Ирака при кладке стен толщиной 120 мм норма выработки определяется в м<sup>2</sup>, при кладке стен толщиной 250 мм и более – в м<sup>3</sup> [16].

Применительно к указанным условиям Ирака организационная структура бригады каменщиков с исполнительными в звеньях в составе двух, трех и четырех рабочих определяет нормативы производительности труда с учетом типа возводимого объекта. Например, для бригады типа «тройка» при кладке стен толщиной 250 мм и более норма выработки составляет 2,3 м<sup>3</sup> в день на бригаду. При организационной структуре типа «четверка» норма выработки составляет 3,1 м<sup>3</sup> в день на бригаду.

На реализацию технологических процессов и норму выработки оказывают влияние вероятностные факторы: дисциплина труда, ритмичность поставок материалов, перебои в подаче воды или электроэнергии, особенности сухого жаркого климата и др.

Расчет показателей эффективности организации производства работ по кирпичной кладке стен зданий таунхаусов осуществляется по следующей методике:

1. Вероятность состояния  $S_0$ , при котором производство имеет ритмичный характер, определяется по формуле (5).

2. Вероятность состояния  $S_1$ , при котором у бригады каменщиков имеются простои критического характера, определяется по формуле (4).

3. Вероятность состояния  $S_2$ , при котором организована сверхурочная работа, определяется по формуле (4).

4. Выработка в ординарный рабочий день (состояние  $S_0$ ) определяется по формуле

$$L_0 = P_0 N_{ord}, \quad (6)$$

где  $L_0$  – выработка производственной бригадой в ординарный рабочий день;  $N_{ord}$  – производственное задание по выработке в ординарный рабочий день;  $P_0$  – вероятность ритмичной работы в ординарный рабочий день.

5. Оплата выполненного объема работ в ординарный рабочий день (состояние  $S_0$ ) вычисляется по формуле

$$L_0^{p0} = P_0 L_{ord}^p, \quad (7)$$

где  $L_0^{p0}$  – оплата выполненных работ бригадой в ординарный рабочий день;  $L_{ord}^p$  – норма оплаты труда за выполненное задание в ординарный рабочий день.

6. Находится снижение выработки (отставание от задания по производительности труда) (состояние  $S_1$ )

$$L_{out} = P_1 N_{ord}, \quad (8)$$

где  $L_{out}$  – выработка в рабочий день с простоями;  $N_{ord}$  – производственное задание по выработке в ординарный рабочий день;  $P_1$  – вероятность возникновения простоев в течение рабочего дня.

7. Определяются денежные средства, оставшиеся не выплаченными из-за невыполненной работы (состояние  $S_1$ ):

$$L_{out}^{po} = P_1 L_{ord}^p, \quad (9)$$

$L_{out}^{po}$  – величина оплаты выполненного объема работ в рабочий день с простоями;

$N_{ord}^p$  – норма оплаты труда за выполненное задание в обычный рабочий день.

8. Выработка в сверхурочное время (состояние  $S_2$ ) вычисляется по формуле

$$L_v = P_2 N_v, \quad (10)$$

где  $L_v$  – выработка в обычный рабочий день;

$N_v$  – производственное задание по выработке в обычный рабочий день;

$P_2$  – вероятность организации сверхурочной работы.

9. Определяется оплата труда за сверхурочную работу (состояние  $S_2$ ):

$$L_v^{po} = P_2 L_v^p, \quad (11)$$

$L_v^{po}$  – величина оплаты выполненного объема работ в рабочий день с простоями;

$P_2$  – вероятность организации сверхурочной работы;

$L_v^p$  – норма оплаты труда за выполненное задание в сверхурочное время.

Результаты верификации предложенной модели, например, для бригад с организацией труда типа «четверка» представлены в табл. 2. Верификация модели выполнена с учетом следующих данных:

1. В бригадах работают: ведущий каменщик – 1; помощник каменщика – 3; подсобный рабочий – 2.

2. Продолжительность обычного рабочего дня 8 ч.

3. Продолжительность сверхурочной работы 2 ч.

4. Задание по производительности труда в обычный рабочий день – 1200 шт. кирпичной кладки.

Таблица 2. Данные о надежности организации кирпичной кладки стен таунхаусов

Организация труда бригады каменщиков	Состояния	Вероятность $P_i$	Производительность (шт./день)	Оплата труда (\$/ч)
I бригада «четверка»	$S_0$	0,862	1034	15,52
	$S_1$	0,104	125	-1,87
	$S_2$	0,034	41	-30,00
II бригада «четверка»	$S_0$	0,660	792	11,88
	$S_1$	0,255	306	-4,59
	$S_2$	0,085	102	30,00
III бригада «четверка»	$S_0$	0,707	848	12,73
	$S_1$	0,219	263	-3,94
	$S_2$	0,074	89	30,00

5. Задание по производительности труда в сверхурочное время – 300 шт. кирпичной кладки.

6. Норма оплаты труда ( $L_{ord}^p$ ) в ординарный рабочий день (например, в эквиваленте долларов США) в среднем 3\$ в час на человека при выполнении дневного задания.

7. Норма оплаты труда ( $L_v^{p0}$ ) в сверхурочное время 5\$ в час на человека при условии выполнения задания.

Количественный подход к оценке надежности организации кирпичной кладки стен позволяет осуществлять:

– формулирование количественных требований к надежности системы в целом и ее элементов;

– оценку и сопоставление уровня надежности функционирования основных элементов и системы в целом;

– оценку эффективности инженерных решений по совершенствованию технологической системы.

В рамках выполненного исследования выявлена возможность постановки и решения следующих задач:

– первая задача позволяет определять показатели надежности организации строительных работ на стадии ее проектирования;

– вторая задача определяет выбор метода оценки и учета показателей надежности организации строительных работ в процессе реализации;

– третья задача направлена на выявление причинно-следственных связей формирования простоев и отказов, установление оптимального уровня надежности отдельных элементов и системы в целом;

– четвертая задача позволяет определять организационную эффективность отдельных элементов и организации в целом.

Предложенная вероятностная математическая модель позволяет решать практические задачи организации кирпичной кладки стен, совершенствования нормирования производительности труда и повышения эффективности реализации технологических процессов.

Нормирование производительности труда осуществляется под влиянием типа объекта, организационной структуры производственной бригады, вероятностных процессов реализации технологии производства работ.

Улучшение организации работ по кирпичной кладке стен таунхаусов в условиях г. Аль-Мутанна (Ирак) целесообразно осуществлять посредством реализации следующих мероприятий:

1. Снижение потерь рабочего времени за счет своевременных поставок строительных материалов на приобъектный склад.

2. Оптимизация поставок материалов на приобъектный склад в соответствии с графиком производства работ.

3. Улучшение качества кирпичной кладки за счет повышения квалификации производственного персонала.

4. Повышение инструментальной оснащенности производства работ.

5. Обеспечение механизации погрузочно-разгрузочных работ и приготовления строительного раствора.

**5. Выводы.** В результате исследования разработана вероятностная математическая модель оценки надежности организации кирпичной кладки стен таунхаусов для условий г. Аль-Мутанна (Ирак), разработаны рекомендации по ее улучшению, а также установлено:

1. Вероятность пребывания системы в состоянии производственного равновесия  $P_0 = 0,72$ . Вероятность простоев и сверхурочной работы каменщиков  $P_1 = P_2 = 0,28$ .

2. Основными причинами остановок производства являются несвоевременная поставка сухих смесей или портландцемента для кладочного раствора (51 %), устранение выявленных дефектов кладки (27 %), другие несистемные причины (22 %).

3. Верификация вероятностной математической модели показала эффективность количественного определения качественных характеристик организации производства.

4. В качестве рекомендаций по улучшению условий реализации технологических процессов предложено оптимизировать поставки строительных материалов и привести их в соответствие с графиками производства работ, повысить квалификацию производственного персонала и культуру его работы.

Сопоставление показателей надежности позволяет принимать объективные и обоснованные решения по улучшению функционирования строительной компании в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А.А., Афанасьев Г.А. Современные технологии малоэтажного строительства // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 2. С. 148–155.
2. Tatum C.B. Construction Engineering Research: Integration and Innovation // Journal of Construction Engineering and Management. 2018. No. 144(3).
3. Javed A., Pan W., Chen L., Zhan W. A systemic exploration of drivers for and constraints on construction productivity enhancement // Built Environment Project and Asset Management. 2018. No. 8(3). P. 239–252.
4. Agrawal A., Halder S. Identifying factors affecting construction labour productivity in India and measures to improve productivity // Asian J. Civ. Eng. 2020. No. 21. P. 569–579.
5. Palikhe S., Kim S., Kim J.J. Critical Success Factors and Dynamic Modeling of Construction Labour Productivity // International Journal of Civil Engineering. 2019. No. 17. P. 427.
6. Love P., Teo P., Morrison J. Revisiting Quality Failure Costs in Construction // Journal of Construction Engineering and Management. 2018. No. 144(2).
7. Gong J., Borchering J.D., Caldas C.H. Effectiveness of craft time utilization in construction projects // Construction Management Economics. 2011. No. 29(7). P. 737–751.
8. Dai J., Goodrum P.M., Maloney W.F. Construction Craft Workers' Perceptions of the Factors Affecting Their Productivity // Journal of Construction Engineering and Management. 2009. No. 135(3).
9. Soekiman A., Pribadi K.S., Soemardi B.W., Wirahadikusumah R.D. Factors Relating to Labor Productivity Affecting the Project Schedule Performance in Indonesia // Procedia Engineering. 2011. No. 14. P. 865–873.

10. Naoum S.G. Factors influencing labor productivity on construction sites: A state-of-the-art literature review and a survey // International Journal Productivity Performance Management. 2016. No. 65(3). P. 401–421.
11. Thomas A.V., Sudhama J. Labour productivity variability among labour force—A case study // International Journal of Engineering Science. 2013. No. 2(5). P. 57–65.
12. Nazarko L. Technology Assessment in Construction Sector as a towards Sustainability // Procedia Engineering. 2015. No. 122. P. 290–295.
13. Nasirzadeh F., Nojedehi P. Dynamic modeling of labor productivity in construction projects // International Journal Project Management. 2013. No. 31(6). P. 903–911.
14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юрайт, 2014. 478 с.
15. Gnedenko B.V., Belyayev Y.K., Solovyev A.D. Mathematical Methods of Reliability Theory // Probability and mathematical statistics. N.Y.: Academic Press, 2014. 518 p.
16. Ministry of Construction, Housing, Municipalities and Public Works in Iraq. Standard Guide for Price Analysis. Part 1. 2013. P. (63\1–65\1).

**Свинцов Александр Петрович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: svintsovap@rambler.ru  
Российский университет дружбы народов, г. Москва

**Аббас Абдулхусейн Абд Нур**, асп.; E-mail: 1042185210@rudn.ru  
Российский университет дружбы народов, г. Москва

Получено после доработки 12.02.2020

**Svintsov Alexander Petrovich**, DSc, Professor; E-mail: svintsovap@rambler.ru

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

**Abbas Abdulhussein Abd Noor**, Post-graduate Student; E-mail: 1042185210@rudn.ru

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

## **PROBABILISTIC MODELING OF LABOR PRODUCTIVITY DURING CONSTRUCTION OF BRICK BUILDINGS OF TOWNHOUSE**

In this research, we studied the influence of various causal factors on the formation of labor productivity of bricklayers in the construction of residential buildings of the “townhouse” type. The analysis accepted the data on daily labor productivity on an ordinary working day, on labor productivity in overtime, on unforeseen shutdowns of the production process which lead to a stop of the corresponding flow of the construction technological system. As a result of the research, a probabilistic mathematical model for assessing the reliability of a building technological system has been developed; recommendations for its improvement were worked out. The research showed the effectiveness of the proposed probabilistic mathematical model for assessing reliability by the parameters of resource usage.

Determining the reliability of the construction technological system of brickwork of the walls of residential buildings of townhouse type is an relevant scientific and technical task, as it allows to give a quantitative assessment to the qualitative features. This minimizes the influence of the subjective factor in the course of data analysis. A comparison of reliability indicators allows you to make objective and informed decisions on improving the functioning of the construction company as a whole.

**Key words:** construction, brickwork, reliability, labor productivity.



REFERENCES

1. Afanas'ev A.A., Afanas'ev G.A. *Sovremennyye tekhnologii maloetazhnogo stroitel'stva* [Modern Technologies of Low-Rise Construction]. Academia. *Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2018. No. 2. Pp. 148–155. (in Russian)
2. Tatum C.B. Construction Engineering Research: Integration and Innovation. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. No. 144(3).
3. Javed A., Pan W., Chen L., Zhan W. A systemic exploration of drivers for and constraints on construction productivity enhancement. *Built Environment Project and Asset Management*. 2018. No. 8(3). Pp. 239–252.
4. Agrawal A., Halder S. Identifying factors affecting construction labour productivity in India and measures to improve productivity. *Asian J. Civ. Eng.* 2020. No. 21. Pp. 569–579.
5. Palikhe S., Kim S., Kim J.J. Critical Success Factors and Dynamic Modeling of Construction Labour Productivity. *International Journal of Civil Engineering*. 2019. No. 17. P. 427.
6. Love P., Teo P., Morrison J. Revisiting Quality Failure Costs in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. No. 144(2).
7. Gong J., Borcharding J.D., Caldas C.H. Effectiveness of craft time utilization in construction projects. *Construction Management Economics*. 2011. No. 29(7). Pp. 737–751.
8. Dai J., Goodrum P.M., Maloney W.F. Construction Craft Workers' Perceptions of the Factors Affecting Their Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2009. No. 135(3).
9. Soekiman A., Pribadi K.S., Soemardi B.W., Wirahadikusumah R.D. Factors Relating to Labor Productivity Affecting the Project Schedule Performance in Indonesia. *Procedia Engineering*. 2011. No. 14. Pp. 865–873.
10. Naoum S.G. Factors influencing labor productivity on construction sites: A state-of-the-art literature review and a survey. *International Journal Productivity Performance Management*. 2016. No. 65(3). Pp. 401–421.
11. Thomas A.V., Sudhakuma J. Labour productivity variability among labour force—A case study. *International Journal of Engineering Science*. 2013. No. 2(5). Pp. 57–65.
12. Nazarko L. Technology Assessment in Construction Sector as a towards Sustainability. *Procedia Engineering*. 2015. No. 122. Pp. 290–295.
13. Nasirzadeh F., Nojedehi P. Dynamic modeling of labor productivity in construction projects. *International Journal Project Management*. 2013. No. 31(6). Pp. 903–911.
14. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Yurayt, 2014. 478 p. (in Russian)
15. Gnedenko B.V., Belyayev Y.K., Solov'yev A.D. *Mathematical Methods of Reliability Theory. Probability and mathematical statistics*. New York, Academic Press, 2014. 518 p.
16. Ministry of Construction, Housing, Municipalities and Public Works in Iraq. *Standard Guide for Price Analysis. Part 1*. 2013. Pp. (63\1–65\1).