УДК [658.531:331.1]:[69.007-05]

© В. В. Сокольников, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: vschief@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-92-97

© V. V. Sokolnikov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: vschief@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

MODELING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CONSTRUCTION

Рассмотрены теоретические вопросы моделирования организационно-технологической надежности строительства. Проанализированы факторы и параметры надежности строительства, предложена математическая модель надежности в виде обобщенного интеграла устойчивости промежуточных результатов выполнения технологических процессов.

Ключевые слова: факторы, параметры надежности, оперативное управление, устойчивость технологического процесса, теоретическая модель.

Theoretical issues of modeling the construction organizational and technological reliability are considered in the article. Factors and parameters of reliability have been analyzed. The author proposes using a reliability mathematical model in the form of the generalized integral of stability of intermediate results of implementing the technological processes.

Keywords: factors, reliability parameters, operational control, technological process stability, theoretical model.

Статья посвящена подходу к моделированию организационно-технологической надежности строительства (далее — О-ТН_{стр}). К настоящему времени выполнено достаточно много исследований в области О-ТН_{стр}, в которых с позиций общей теории надежности, обеспечения управляющих воздействий, безотказности техники и надежности технических объектов, эффективности инвестиций, оценки и прогнозирования рисков сформирована теоретическая база надежности. По определению А. А. Гусакова, организационно-технологическая надежность — это «способность организационных, технологических, управленческих экономических решений обеспечивать достижение заданного результата строительного производства в условиях случайных возмущений, присущих строительству как сложной вероятностной системе» [1]. Определение О-ТН_{стр}, данное А. А. Гусаковым, абстрактно описывающее строительство как вероятностную систему решений и заданного результата, функционирующую в условиях случайных возмущений,

содержит указание на область поиска методов моделирования О-ТН_{стр} путем вероятностных оценок эффективности принятых или предполагаемых к принятию решений. Следует отметить, что высокий уровень абстракции определения имеет следствием неопределенность круга понятий, к которым применимо понятие О-ТН_{стр}, в том числе: планирование строительства [2], строительные процессы [3], календарный план [4], подготовка строительного производства [5], ресурсное обеспечение [6]. Для технических объектов понятие «надежность»¹ раскрывается через понятия безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости, параметры которых имеют различную размерность. В свою очередь, понятие «строительство»², определяемое в Градостроительном кодексе РФ как «создание сооружений», т. е. как поэтапный процесс,

¹ Международный стандарт ISO 9001 «Модель обеспечения качества при проектировании, производстве, монтаже и обслуживании». М.: Госстандарт, 1999. 50 с.

² «Градостроительный кодекс РФ» от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 23.04.2018).

используется также в смысле «отрасль» — совокупность материально-технических и трудовых ресурсов хозяйствующих субъектов. Следовательно, применительно к строительству определение $O-TN_{стр}$ может быть основано на соотношениях следующих параметров: этапы, периоды, результаты выполнения процессов и текущая потребность/порядок расходования ресурсов. Организационно-технологическую надежность строительства можно понимать не только в контексте определения надежности строительства как технического объекта, но и в контексте выполнения требований стандарта ISO 9001 о «наблюдаемости», «выполнимости» и «управляемости»³, например: полноты рабочей документации для обоснования детализации методов организации строительного производства, определяющих способы и ключевые параметры осуществления технологических процессов и строительного контроля, а также порядок ресурсного обеспечения техпроцессов.

Определение $O-TN_{стр}$ А. А. Гусакова в [1] по смыслу весьма близко понятию «устойчивости системы к случайным воздействиям», а устойчивость (результата) системы определяется, как известно [7], начально-конечными и граничными условиями и соответствующими им динамическими характеристиками (запасом устойчивости) элементов системы по контролируемым параметрам (этапы, периоды, выполнение процессов, а также текущей потребности/порядку расходования ресурсов), т. е. в соответствии с теорией: запас по количеству и качеству (амплитуде) и по времени (фазе). Такая трактовка определения [1], равно как смысл требований стандарта ISO 9001 обосновывает детерминированный подход к исследованию $O-TN_{стр}$ и возможность построения непрерывно-детерминированной модели $O-TN_{стр}$ в виде математической функции, удовлетворяющей заданным начальным условиям, граничным условиям и конечным условиям для параметров: подготовки строительства, допустимых отклонений выполнения техпроцессов, текущей потребности/порядку расходования ресурсов и текущего результата строительства соответственно. Динамическое же моделирование

$O-TN_{стр}$, согласно [8], сводится к моделированию «положительных и отрицательных обратных связей... в ускоренном масштабе времени», которые, согласно [7], и обеспечивают устойчивость системы в условиях случайных воздействий. Величины же коэффициентов обратных связей при динамическом моделировании определяются из непрерывно-детерминированной модели $O-TN_{стр}$.

На основании изложенного можно сделать вывод, что детерминированная модель $O-TN_{стр}$ объясняет зависимость параметров (текущего) результата строительства от начальных и граничных условий параметров его подготовки, соблюдения технологической дисциплины и ресурсного обеспечения технологических процессов. Для выработки подхода к построению детерминированной модели $O-TN_{стр}$ предположим, что при установлении наилучших с точки зрения $O-TN_{стр}$ соотношений:

- объемно-планировочных, конструктивных параметров сооружения и параметров стройгенплана с параметрами организационно-технологических схем возведения частей сооружений, выполнения отдельных технологических процессов;
- параметров календарных планов работ и поставок, параметров стройгенплана с параметрами организационных схем возведения отдельных частей сооружений;
- своевременности ресурсного обеспечения и выполнения участниками строительства технических регламентов и требований строительного контроля уровень $O-TN_{стр}$ строительства характеризует отклонение технических параметров качества строительной продукции от нормативных, а также отклонение сроков строительства от плановых.

Таким образом, факторами $O-TN_{стр}$ можно считать: проектные решения, строительные технологии, организационно-технологические решения по способам выполнения технологических процессов, выполнение требований строительного контроля, а также оперативное управление строительными процессами и их ресурсным обеспечением в условиях возникающих отклонений параметров вышеперечисленных факторов.

³ Международный стандарт ISO 9001 «Модель обеспечения качества при проектировании, производстве, монтаже и обслуживании». М.: Госстандарт, 1999. 50 с.

Учитывая взаимное влияние факторов, О-ТН_{стр} можно свести к математическому представлению в виде функции двух независимых вещественных переменных — x_{res} и y_{org} , каждая из которых зависит от параметров, определяемых вышеперечисленными факторами:

- x_{res} — текущий результат технологического процесса (*строительства как совокупности технологических процессов*) в размерности ресурсных параметров его выполнения: кадрово-квалификационных и материально-технических;
- y_{org} — текущий результат технологического процесса (*строительства как совокупности технологических процессов*) в размерности организационных параметров его выполнения: сроков, технологической последовательности, внутри- и внеплощадочных ограничений выполнения процесса.

В ходе строительства объекта независимые переменные x_{res} и y_{org} в каждый момент времени принимают отличные от нуля значения и характеризуются комплексной величиной $z = f(x_{res}, y_{org})$. В системе алгоритмических связей параметров выполнения технологических процессов, называемой «организация строительного производства», календарный график работ представляет собой совокупность точек, лежащих в комплексной плоскости XOY , где ось действительных переменных X является осью времени и ось Y — осью значений преобразований ресурсов технологическими процессами в строительную продукцию. В системе же алгоритмических связей параметров выполнения технологических процессов, называемой «организационно-технологическая надежность», процессы преобразований материальных ресурсов, составляющие календарный график, соответствуют оси X' действительных переменных, а время — оси Y' мнимых переменных. Следовательно, имеем две развернутые друг относительно друга на 90° системы (координатных осей): первая система — «организация строительного производства» и вторая — «организационно-технологическая надежность строительства». Во второй системе время t интерпретируется как мнимая составляющая iy комплексной функции О-ТН_{стр}, в то время как в первой системе оперируют действительной переменной координат «время».

Учитывая вышеизложенное О-ТН_{стр}, рассматриваемую во второй системе координат, можно представить непрерывной функцией $\Re$ комплексной переменной z вида

$$\Re = f(z) = u(x_{res}, y_{org}) + iv(x_{res}, y_{org}),$$

где $z = x_{res} + iy_{org}$; $u(x_{res}, y_{org})$ — функция качества СМР; $v(x_{res}, y_{org})$ — функция продолжительности строительства $T_{смр}$.

Поскольку устойчивость (нормативный характер) текущего результата выполнения технологических процессов, кроме непосредственно рабочих-исполнителей, обеспечивается реакцией оперативного управления на возникающие отклонения, а также выполнением требований строительного контроля, то для устойчивости $\Im(t)$, характеризующей отклонения параметров текущих результатов всех выполняемых в момент t_i технологических процессов можно записать следующее выражение

$$\Im(x_{res}, y_{org})_{|t_i} = \frac{\partial^2 f(H_{o,y})}{\partial x_{res} \partial y_{org}}; \Im \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $H_{o,y}$ — напряженность оперативного управления технологическим процессом [9].

Тогда, переходя от устойчивости выполнения технологических процессов к организационно-технологической надежности строительства, интегрируя $\Im(t)$ по времени, для $\Re$ имеем:

$$\Re = \frac{1}{T_{смр}} \int_0^{T_{смр}} \Im dt = \frac{K_{o-т.д.}}{T_{смр}} \int_0^{T_{смр}} \int_1^n \int_1^m \frac{K_{с.к.}(t)}{H_{oy}(t)} \partial x_{res} \partial y_{org} \partial t; \quad 0 \leq \Re \leq 1; \Re \rightarrow 0, \quad (2)$$

где $K_{с.к.}$ — переменная (коэффициент) выполнения требований строительного контроля; n, m — число ресурсных и организационных параметров выполнения технологических процессов соответственно; $K_{o-т.д.}$ — переменная (коэффициент) соответствия организационно-технологической документации, характеризующий достаточность детализации и степень соответствия организационно-технологических схем выполнения технологических процессов календарным графикам работ и поставок, объемно-планировочным и конструктивным решениям сооружения, а также параметрам стройплощадки и наиболее сложных рабочих мест.

Полученное выражение (2) позволяет дать следующее определение О-ТН_{стр}.

Организационно-технологическая надежность строительства $O-TN_{стр}$ — это соотношение организационно-технологических решений и схем выполнения технологических процессов объемно-планировочным и конструктивным особенностям возводимого сооружения, а также методическим и техническим средствам оперативного управления технологическими процессами, обеспечивающее:

- поддержание квалифицированными участниками строительства требуемых значений организационных и ресурсных параметров выполнения технологических процессов;
- своевременное установление иных соотношений параметров выполнения технологических процессов и их ресурсного обеспечения при вероятности или возникновении отклонений;
- минимизацию периодов времени указанных отклонений до значений, не влияющих на сроки введения объекта и качество СМР.

Дифференциальная форма модели $O-TN_{стр}$ (1) теоретически может быть исследована методами теории автоматического регулирования путем составления и расчета элементов схемы регулирования организационных и ресурсных параметров выполнения технологических процессов. Схема, как следует из вышеизложенного, содержит минимум пять групп «входов» и конечное число «выходов», соответствующее общему числу критериев управления процессами, ветви положительной и отрицательной обратной связи по параметрам вышеприведенных факторов, математические выражения передаточных функций регулирующих элементов, включающие измеряемые параметры выполнения технологических и обеспечивающих процессов. Практическая реализация дифференциальной модели $O-TN_{стр}$ (1) лежит в области разработки информационных технологий на основе интегрирования и конфигурирования программных продуктов автоматизации рабочего проектирования, выпуска организационно-технологической документации, оперативного управления строительными и обеспечивающими процессами, а также выполнения строительного контроля.

Исследования интегральной формы модели $O-TN_{стр}$ (2) могут вестись в области разработки и автоматизации методики расчета коэффициента $K_{о-т.д}$ (2), задающего начальный уровень (началь-

ные условия) организационно-технологической надежности строительства. Эти исследования включают:

- обоснования начальных и граничных условий применения теоретических методов организации строительного производства, в том числе градацию уровней детализации их рассмотрения применительно к способам выполнения технологических процессов и их ключевых операций в условиях различной строительной готовности объектов;
- разработку методики расчета $K_{о-т.д}$ (2) для сооружений различного назначения, различных конструктивных систем, с учетом существенных особенностей объемно-планировочных решений, полноты проектной документации, по сути — обоснование шкалы организационно-технологической сложности объектов.

Указанные исследования повлекут существенные для повышения $O-TN_{стр}$ уточнения положений расчетных методов поточной организации работ в строительстве в части правил выделения частных фронтов, расчетов численного и определения квалификационного состава бригад, расчета продолжительностей выполнения комплексов работ на частных фронтах, расчета объемов текущей потребности техпроцессов в ресурсах, форм и содержания организационно-технологической документации в составе ППР. Кроме этого, на основании интегральной модели возможно выполнить обоснования нормативов трудоемкости разработки организационно-технической документации в зависимости от организационно-технической сложности объектов, включая обоснования положений договорной документации в части регламентирования выполнения требований строительного контроля $K_{с.к}$ (2).

Выводы

1. При разработке и исследовании детерминированной модели $O-TN_{стр}$ моделирование должно учитывать следующие факторы: проектные решения, строительные технологии, организационно-технологические решения по способам выполнения технологических процессов, выполнение требований строительного контроля, а также оперативное управление строительными процессами и их ресурсным обеспечением. Моделирование должно вклю-

чать разработку параметрически связанных: организационно-технологических схем возведения частей сооружений, решений по выполнению ключевых технологических операций в условиях конкретной строительной готовности объекта, моделей взаимодействия участников строительства при выполнении требований строительного контроля, а также моделей оперативного управления технологическими процессами и их ресурсным обеспечением.

2. Предложенная модель (формулы (1), (2)) объясняет с позиций обеспечения качества СМР и расчетного срока строительства общий характер зависимости $O-TN_{стр}$ от устойчивости выполнения технологических процессов и является одним из вариантов развития теоретической модели поточной организации работ в строительстве и ее приложения к проблеме организационно-технологической надежности. После всесторонних исследований и разработки на ее основе инженерных расчетных методик и программных средств их автоматизации и эксплуатации модель (2) может применяться для заблаговременных, с целью определения узких мест организации и управления, количественных оценок $O-TN_{стр}$, выполняемых в размерностях значений материально-технических, организационных, пространственных, стоимостных и временных параметров выполнения технологических процессов.

Библиографический список

1. Гусаков А. А., Гинзбург А. В., Веремеенко С. А., Монфред Ю. Б., Прыкин Б. В., Яровенко С. М. Организационно-технологическая надежность строительства. М.: SVR-Аргус, 1994. 472 с.
2. Михальченко О. Ю. Организационная надежность планирования строительства объектов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 150 с.
3. Легостаева О. А. Совершенствование организационно-технологической надежности строительных процессов в инженерных проектах: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 203 с.
4. Абдуллаев Г. И., Величкин В. З., Солдатенко Т. Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования отказов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3. С. 43–50.
5. Керимов Ф. Ю. Повышение организационно-технологической надежности подготовки строитель-

ного производства в условиях снижения ресурсного обеспечения: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 356 с.

6. Кузнецов П. А. Организационно-технологическая надежность ресурсного обеспечения строительного переустройства аварийных объектов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 426 с.

7. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение. М.: Машиностроение, 1972. 544 с.

8. Лебедев В. М. Функционально-системное проектирование поточного строительства. Белгород: БГТУ, 2007. 216 с.

9. Сокольников В. В. Совершенствование оперативного планирования строительного-монтажных работ и их ресурсного обеспечения на основе единой информационной среды управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 23 с.

10. Абдуллаев К. И. Организационно-технологическая надежность строительства линейно-протяженных сооружений (на примере тоннелей метрополитена): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 21 с.

11. Недавий О. И., Базилевич С. В., Кузнецов С. М. Оценка организационно-технологической надежности строительства объектов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 137–141.

12. Кузнецов С. М., Маслов И. А., Суворов А. Д., Ячменьков С. Н. Оценка надежности организационно-технологических решений в строительстве // Транспортное строительство. 2007. № 1. С. 26–27.

References

1. Gusakov A. A., et al. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva* [Organizational and technological reliability of construction]. Moscow, SVR-Argus Publ., 1994, 472 p.
2. Mikhailchenko O. Yu. *Organizatsionnaya nadezhnost' planirovaniya stroitel'stva ob'ektov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Organizational reliability of facilities' construction planning. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, 2012, 150 p.
3. Legostaeva O. A. *Sovershenstvovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'nykh protsessov v inzhenernykh projektakh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the organizational and technological reliability of construction processes in engineering projects. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, 2007, 203 p.
4. Abdullaev G. I., Velichkin V. Z., Soldatenko T. N. *Povyshenie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva lineynno-protyazhennykh sooruzheniy metodom prognozirovaniya otkazov* [Increasing of the organizational and technological reliability of erecting linearly - extended structures by the method of refusals' forecasting].

Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal, 2013, no. 3, pp. 43–50.

5. Kerimov F. Yu. *Povyshenie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti podgotovki stroitel'nogo proizvodstva v usloviyakh snizheniya resursnogo obespecheniya. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Increasing the organizational and technological reliability of preparation of construction process in conditions of resource procurement decreasing. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2005, 356 p.

6. Kuznetsov P. A. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' resursnogo obespecheniya stroitel'nogo pereustroystva avariynykh ob'ektov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Organizational and technological reliability of providing the emergency reconstruction of construction facilities. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2006, 426 p.

7. Syu D., Meyer A. *Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i ee primeneniye* [Modern theory of automatic control and its application]. Moscow, Mashinostroyeniye – Mechanical engineering, 1972, 544 p.

8. Lebedev V. M. *Funktsional'no-sistemnoye proektirovaniye potochnogo stroitel'stva* [Functional and system design of streamline construction]. Belgorod, BSTU Publ., 2007, 216 p.

9. Sokol'nikov V. V. *Sovershenstvovaniye operativnogo planirovaniya stroitel'no-montazhnykh rabot i ikh*

resursnogo obespecheniya na osnove edinoi informatsionnoy sredy upravleniya. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of operational planning of construction and installation works and their resource procurement on the basis of the uniform information management environment. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2017, 23 p.

10. Abdullaev K. I. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva lineynno-protyazhennykh sooruzheniy (na primere tonneley metropolitena). Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Organizational and technological reliability of construction of linearly - extended structures (on the example of the subway tunnels). Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2003, 21 p.

11. Nedavniy O. I., Bazilevich S. V., Kuznetsov S. M. *Otsenka organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva ob'ektov* [Assessment of organizational and technological reliability of facilities' construction]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2013, no. 2 (18), pp. 137–141.

12. Kuznetsov S. M., Maslov I. A., Suvorov A. D., Yachmen'kov S. N. *Otsenka nadezhnosti organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy v stroitel'stve* [Assessment of reliability of organizational technology solutions in construction]. *Transportnoye stroitel'stvo – Transport construction*, 2007, no. 1, pp. 26–27.