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 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ПОТОКА

MODELING OF WORK ORGANIZATION BASED ON THE CONCEPT OF PHYSICAL CONSTRUCTION STREAM

Проанализированы существующие теоретические подходы и расчетные методы поточной организации работ при возведении отдельного сооружения. Рассмотрены теоретические вопросы моделирования поточной организации работ. Разработаны основные теоретические положения концепции расчета параметров организации работ на основе математической модели физического строительного потока.

Ключевые слова: строительный поток, технологический поток, строительная готовность, векторное поле скоростей, частный фронт выполнения рабочих операций комплекса технологических процессов, единичный промежуток времени.

The article presents the result of analysis of the currently used theoretical approaches and calculation methods of streamline organization of works for the case of erecting a single construction unit. Some theoretical problems of modeling the streamline work organization are considered. There have been developed some basic theoretical provisions of the concept of calculating the work organization parameters using a mathematical model of physical construction stream.

Keywords: construction stream, technological stream, construction completion status, speed vector field, private front of implementing the technology complex work procedures, unit period of time.

К настоящему времени выполнено достаточно много исследований в области поточной организации выполнения технологических монтажно-укладочных процессов [1–6], в которых с позиций методологии использования экспериментальной базы нормативов затрат труда рабочих и времени эксплуатации строительных машин на изготовление строительных конструкций фиксированной номенклатуры и в принятых измерителях (сборники норм времени и расценок ЕРЕР84, ЕНиР86, ТЕР200, ФЕР2000, ВНиР и др.) получены и исследованы методы расчета параметров поточной организации строительных работ при календарном планировании строительства. Поточная организация работ представлена в настоящее время, в том числе, известными методами расчета продолжительности строительства, результаты вычислений по которым в достаточной степени коррелируют с дан-

ными СНиП 1.04.03-85* «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений». Основными недостатками существующих расчетных методов календарного планирования поточной организации работ следует считать слабую методическую связь как расчетных алгоритмов, так и используемых нормативов с конструктивными и объемно-планировочными особенностями сооружений, методические сложности выделения частных фронтов выполнения технологических процессов, невысокую достоверность закладываемых в расчеты удельных (нормативных) величин затрат труда и машинного времени, а также слабую корреляцию расчетных методов с производственными возможностями подрядных строительных компаний. Это вызвано тем, что вышеуказанные нормативы были предназначены, в первую очередь, для обоснования величины

оплаты труда рабочих за фактически выполненную работу и ограниченно могут использоваться при составлении календарных графиков работ высокой детализации. Указанные обстоятельства существенно сужают круг применимости и снижают полезность указанных методов организации строительных работ при разработке организационно-технологической документации для строительства объектов в современных условиях. Таким образом, с целью развития теории поточной организации строительных работ и совершенствования ее расчетных методов представляется целесообразным рассмотреть возможность иного подхода к разработке методов решения задач поточной организации работ. Поскольку большинство теоретических методов строительной науки базируется на принципах классической механики и методах математической физики, разумно применить аналогичную методологию для достижения указанной выше цели.

Возведение сооружения выполняется в вертикальном направлении в площади его горизонтальной проекции и представляет, по сути, постепенное заполнение пустого объема строительными конструкциями с объемным распределением их массы в соответствии с проектной документацией. Заполнение пустого объема выполняется со скоростью движения конструкций V , вызываемой действием приложенных к ним сил F в течение промежутков времени dt . Таким образом, продолжительность возведения сооружения $T = h/V_z$, где h — высота сооружения; V_z — вертикальная составляющая скорости монтажа конструкций. Это соответствует положениям [8], согласно которым задача анализа сводится к наложению предельных переходов на алгебраические операции. То есть, при решении задач анализа сначала необходимо выделить алгебраическое ядро, а затем сформировать теоретическую функциональную оболочку, накладываемую предельными переходами. Рассматривая возведение сооружения как физический процесс, следует иметь в виду, что все операции анализа выполняют только над измеряемыми физическими величинами, которые зависят от времени и от пространственных координат и которые изменяются как при переходе от точки к точке пространства, так и с течением времени. Их можно

определить как функции координат x, y, z и времени t . В этом случае мы приходим к некоторым зависимостям между частными производными этих функций. Большинство физических законов выражаются в виде подобных дифференциальных уравнений в частных производных. Нахождение значений этих физических величин сводится к решению в соответствующих системах координат этих уравнений, к которым надо присоединить начальные и краевые условия [7].

С точки зрения классической механики, выполнение рабочих операций из состава технологических процессов в рассматриваемой области пространства строящегося сооружения — это движение элементов (де)монтируемых конструкций, материалов, технологической оснастки, сообщаемое им действием сил в течение некоторого промежутка времени. Скорость такого движения является мерой сил, приложенных к этим элементам и названных автором [9] при описании им третьего принципа механики *ускоряющими силами*. Для рассматриваемого в статье случая результатом такого движения является изменение массы готовых конструкций: увеличение массы — при монтаже и уменьшение — при демонтаже. Массу готовых конструкций можно считать мерой строительной готовности сооружения. Поскольку движения элементов конструкций, обрабатываемых различными рабочими операциями в единичный промежуток времени dt , являются независимыми, то сопоставление каждому двигающемуся элементу в каждой точке рассматриваемого пространства вектора прикладываемой силы образует поле этого вектора, или векторное поле *технологического потока*. В свою очередь, если изменению массы готовых (смонтированных или демонтированных) конструкций за единичный промежуток времени в каждой точке пространства с проектным распределением плотности конструкций сопоставлен вектор скорости *изменения строительной готовности* части сооружения, то эта скорость также является мерой *силы технологического потока*.

Изменение массы готовых конструкций на частном фронте (захватке) физически соответствует объемному расширению/сжатию части пространства сооружения, заполненной готовыми конструкциями в ходе (де)монтажа.

Смещение элементов конструкций к месту укладки, или в автотранспорт, или в штабели физически соответствует параллельному переносу и повороту (де)монтируемых элементов в ходе выполнения рабочих операций на фронте (захватке). Масса, по определению математической физики, является скалярной величиной. Ее приращение за единицу времени является мерой объемного расширения [7] возводимых конструкций, поэтому поле вектора V строительного потока в области пространства сооружения, занятой готовыми строительными конструкциями, является *безвихревым*. В области же пространства сооружения, не занятой готовыми конструкциями, в силу физической природы причины поворота и параллельного переноса элементов конструкций — *ускоряющей силы*, векторной величины, поле вектора строительного потока является *вихревым*. Таким образом, поле вектора строительного потока на частном фронте может быть рассчитано по его *источникам* (стокам) и *вихрям*, а сам строительный поток описывается согласно [10] следующими уравнениями:

$$\operatorname{div} V = 4\pi\rho_k; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} V - \frac{\partial \mu}{\partial t} = 4\pi F, \quad (1')$$

где V — вектор строительного потока; $\rho_k(x, y, z)$ — конструктивная плотность сооружения на частном фронте (захватке) — скалярная величина, $\rho_k = f(x, y, z)$ является функцией координат x, y, z ; измеритель $\rho_k = \rho_m \left(\frac{S_k}{S_f} \right)$ (ρ_m — единица измерения удельного веса материала конструкции; S_k — сумма площадей максимальных проекций элементов конструкции, или развернутая поверхность (де)монтируемого покрытия на фронте (захватке); S_f — площадь частного фронта выполнения технологического процесса; F — вектор технологического потока. Скалярное произведение векторов V и F , согласно [10], определяет величину работы технологического потока по созданию единицы количества строительной готовности конструкций за промежуток времени dt , что соответствует действительности. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении размерности технологического потока, поскольку единицу измерения (потока) можно выбрать произвольно либо свести

ее к ранее выбранным, с которыми она связана некоторыми уравнениями. Решение этих уравнений относительно новой единицы называют ее размерностью по отношению к остальным единицам [10]; $\mu(t)$ — плотность технологической оснастки, смонтированной в области проектного распределения ρ_k конструктивной плотности сооружения на частном фронте (захватке), $\mu = \rho_{to} \left(\frac{S_o}{S_f} \right)$ — скалярная величина (ρ_{to} — единица измерения удельного веса оснастки; S_o — сумма площадей максимальных проекций элементов оснастки, или развернутая поверхность (де)монтируемой оснастки; S_f — площадь частного фронта выполнения технологического процесса).

Случаю монтажа/демонтажа/перестановки технологической оснастки в ходе выполнения рабочих операций соответствует изменение ее плотности $\mu(t)$, что и отражено в уравнении (1'). Если же операции различных технологических процессов выполняются в промежуток времени dt без смещения технологической оснастки, то $\frac{\partial \mu}{\partial t} = 0$ и (1') переходит в

$$\operatorname{rot} V = 4\pi F. \quad (1'')$$

Согласно [7, 8, 10], интересующая нас вертикальная составляющая вектора строительного потока, как определяющая вертикальную скорость возведения сооружения,

$$\operatorname{rot}_z V = \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y}$$

определяется горизонтальной составляющей вектора технологического потока, что соответствует действительности, поскольку на фронте (захватке) основные усилия технологических операций по смещению и повороту элементов выполняются рабочими на высоте не выше 1 м от опорной поверхности, т. е. в горизонтальной плоскости.

Следуя [10], разложим поле вектора строительного потока V на безвихревое поле вектора V_1 с заданными «источниками» (при демонтаже), или, что то же самое, но с обратным знаком — «стоками» (при монтаже), и на поле вектора V_2 без источников, но с заданными вихрями:

$$V = V_1 + V_2,$$

где V_1 — скорость изменения строительной готовности (массы) (де)монтируемых конструкций, удовлетворяет условиям $\operatorname{div} V_1 = 4\pi\rho$,

$\text{rot } V_1 = 0$; V_2 — скорость смещения элементов (де)монтируемых конструкций, удовлетворяет условиям $\text{rot } V_2 = 4\pi F$, $\text{div } V_2 = 0$.

Согласно [10], решение для поля вектора V_1 в области, занятой готовыми конструкциями, ищется в виде

$$V_1 = -\text{grad } \varphi = -\text{grad} \iiint \frac{\rho_l}{r} - dv_1, \quad (2)$$

где φ — скалярный потенциал строительной готовности сооружения на фронте (захватке); r — радиус условной поверхности вращения, площадь которой эквивалентна развернутой поверхности готовых конструкций, внутри которой распределена масса готовых конструкций; v_1 — объем пространства, занятого готовыми конструкциями.

Далее, с целью получения решения для V_2 , согласно [10], F следует представить как вихрь другого вектора: $F = \text{rot } A$, где вектор A является векторным потенциалом технологического потока вне области, занятой готовыми конструкциями. Следуя [10], получаем решение для векторного потенциала A поля строительного потока: $\text{rot } V_2 = \text{rot rot}(A)$, и так как $\text{div } V_2 = 0$ по условию разделения вектора V , то $\Delta A = -4\pi F$, где Δ — оператор Лапласа и, следовательно, решение для векторного потенциала A будет иметь вид

$$A = \iiint \left(\frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{F}{r} \right) dv_2, \quad (3)$$

где r — расстояние между соседними рабочими местами выполнения рабочих операций комплекса технологических процессов на фронте; v_2 — объем пространства, не занятого готовыми конструкциями.

Полученные выражения для векторного потенциала A и скалярного потенциала φ являются решениями уравнений (1), (1') и (1''), описывающих векторное поле строительного потока. С точки зрения организации работ нас, в первую очередь, будет интересовать решение уравнения (3). В зависимости от геометрической формы рассматриваемой части сооружения уравнение (3) решается в соответствующей системе координат. Количество рабочих мест на фронте (захватке) определяется на основе добавления к уравнению (3) краевых условий для векторного потенциала A , а также разложением подынтегральной функции (3) в ряд Тэйлора [11].

Все вышеизложенные рассуждения приводились в предположении, что промежуток времени dt имеет постоянную, достаточно малую по сравнению с продолжительностью строительства величину, в течение которой величины выполненных работ пропорциональны приложенным силам, что принципиально отличает изложенный подход от существующей «нормативной» методологии, когда каждому измерителю выполненной работы соответствуют единичные промежутки времени (нормы времени) различной величины. Варьируя величину векторного потенциала A , по сути, мы изменяем «выработку технологического потока» заготовительных, подготовительных, транспортных и монтажно-укладочных [13] операций на одно рабочее место за установленный промежуток времени, что также можно интерпретировать как «вариацию производительности» строительной компании — исполнителя подрядных работ. В совокупности с краевыми и начально-конечными условиями для A и технологического потока F , устанавливаемыми для конкретного сочетания объемно-планировочных и конструктивных решений на каждом частном фронте, указанными вариациями можно добиться существенного повышения точности расчетов параметров поточной организации работ, в том числе общей продолжительности возведения отдельного объекта.

Выводы

1. Геометрическое представление плотности строительного потока как вектора в точке рассматриваемой области пространства (на частном фронте) возводимого сооружения:

а) позволяет определить строительный поток как векторное поле в рассматриваемой области, описываемое двумя уравнениями для двух переменных: векторного потенциала A технологического потока и скалярного потенциала φ строительной готовности сооружения. Организация работ, иначе — строительный поток, является непрерывной функцией $f(A, \text{grad } \varphi)$ указанных переменных, которые вычисляются через физические измерители основной системы единиц измерений: время, масса, длина [7];

б) сформировано на основе анализа объемно-планировочных и конструктивных решений частей сооружения, что делает эффективным и естественным использование технологии

ВМ-моделирования для информационного обеспечения вычислений по модели строительного потока и прежде всего — для выделения частных фронтов.

2. Полученная векторная математическая модель строительного потока позволяет разработать практические инженерные формулы расчетов параметров поточной организации строительных работ для сооружений с любыми сочетаниями объемно-планировочных решений и конструктивных систем. В том числе для расчета продолжительности возведения сооружения путем суммирования по выделенным фронтам произведений величины вертикальной составляющей V_z вектора строительного потока на разность высотных отметок фронта.

3. Поточная организация выполнения технологических процессов заключается в координации расположения рабочих мест выполнения рабочих операций на выделяемом фронте (захватке) в рассматриваемый промежуток времени. Мерой поточности выполнения технологических процессов является величина векторного потенциала A технологического потока. Если число полученных величин A больше, чем число выделенных фронтов, то выполнено координирование отдельных рабочих мест на фронтах. По соотношению числа векторных потенциалов A и числа выделенных фронтов, а также по анализу величин A и расчетной продолжительности строительства можно судить о соответствии организационно-технологической документации на возведение объекта его объемно-планировочным и конструктивным особенностям [12].

4. В зависимости от размеров рассматриваемой области пространства объекта, в которой рассматривается строительный поток V , — стройплощадка, частный фронт или захватка, — понятие «организация строительства» имеет одну из трех трактовок:

а) организация выполнения внутриплощадочных транспортных, подготовительных, заготовительных технологических процессов [13], иначе — организация строительного производства на стройплощадке;

б) поточная организация выполнения объемов работ комплекса простых технологических монтажно-укладочных процессов [13] на част-

ном фронте в течение контрольного промежутка времени (например 1 неделя (40 ч));

в) организация выполнения рабочих операций на захватке в течение единичного промежутка времени (например 8 ч).

Математические модели приведенных выше трактовок понятия «организация строительства» будут отличаться только начально-конечными условиями для строительного потока V , краевыми условиями для технологического потока F и векторных потенциалов A на каждом фронте, а также функциональными зависимостями векторных потенциалов A , соответствующих различным сочетаниям объемно-планировочных и конструктивных решений сооружения на захватках (фронтах). Также строительный поток, сформированный по критериям оптимального соотношения параметров организации работ всех либо любой из трех трактовок организации строительства, является фактором, повышающим организационно-технологическую надежность строительства [12].

Библиографический список

1. Афанасьев В. А. Поточная организация работ в строительстве. СПб.: СПбГАСУ, 2000. 149 с.
2. Будников М. С., Недавий П. И., Рыбальский В. И. Основы поточного строительства / под ред. М. С. Будникова. Киев: Госстройиздат УССР, 1961. 414 с.
3. Сандан Р. Н. Совершенствование методов календарного планирования строительно-монтажных работ на уровне простых технологических процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 21 с.
4. Чахкиев И. М. Оптимизация трудовых ресурсов при обосновании директивных сроков строительства уникальных объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 20 с.
5. Бовтеев С. В. Развитие теории и практики формирования и оптимизации параллельно-поточной организации работ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 24 с.
6. Симанкина Т. Л. Совершенствование календарного планирования ресурсосберегающих потоков с учетом аддитивности интенсивности труда исполнителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 17 с.
7. Вебстер А., Сеге Г. Дифференциальные уравнения в частных производных математической физики. Ч. 1. М.; Л.: ОНТИ, 1934. 285 с.
8. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. М.; Л.: ГТТИ, 1933. Т. 1. 525 с.

9. Лагранж Ж. Аналитическая механика. М.; Л.: ГИТТЛ, 1950. Т. 1. 594 с.

10. Абрагам М., Беккер Р. Теория электричества. М.; Л.: ГОНТИ НКТП СССР, 1939. 259 с.

11. Идельсон Н. И. Теория потенциала и ее приложение к вопросам геофизики. М.; Л.: ГТТИ, 1932. 348 с.

12. Сокольников В. В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 92–97.

13. Юдина А. Ф., Верстов В. В., Бад'ин Г. М. Технологические процессы в строительстве. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 304 с.

References

1. Afanas'ev V. A. *Potochnaya organizatsiya rabot v stroitel'stve* [Streamline work organization in construction]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2000, 149 p.

2. Budnikov M. S., Nedavniy P. I., Rybal'skiy V. I. *Osnovy potochnogo stroitel'stva* [Fundamentals of construction work streamlining]. Ed. by Budnikov M. S. Kiev, Gosstroyizdat USSR Publ., 1961, 414 p.

3. Sandan R. N. *Sovershenstvovanie metodov kalendarnogo planirovaniya stroitel'no-montazhnykh rabot na urovne prostykh tekhnologicheskikh protsessov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the methods of construction and installation work scheduling at the level of simple technological processes. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2011, 21 p.

4. Chakhkiev I. M. *Optimizatsiya trudovykh resursov pri obosnovanii direktivnykh srokov stroitel'stva unikal'nykh ob'ektov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Optimization of labour resource at determining the scheduled time of unique object construction. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2015, 20 p.

5. Bovteev S. V. *Razvitie teorii i praktiki formirovaniya i optimizatsii paralel'no-potochnoy organizatsii rabot.*

Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of the theory and practice of formation and optimization of parallel-stream work organization. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2000, 24 p.

6. Simankina T. L. *Sovershenstvovanie kalendarnogo planirovaniya resursosberegayushchikh potokov s uchetom additivnosti intensivnosti truda ispolniteley. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Improvement of calendar planning of resource-saving streams taking into account the additivity of workers' labour intensity. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2007, 17 p.

7. Webster A., Sege G. *Differentsial'nye uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Differential equations in private derivatives of mathematical physics]. Pt. 1. Moscow; Leningrad, ONTI Publ., 1934, 285 p.

8. Kurant R., Gil'bert D. *Metody matematicheskoy fiziki* [Methods of mathematical physics]. Moscow; Leningrad, GTTI Publ., 1933, vol. 1, 525 p.

9. Lagranzh Zh. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical mechanics]. Moscow; Leningrad, GITTL Publ., 1950, vol. 1, 594 p.

10. Aбрагам М., Беккер Р. *Teoriya ehlektrichestva* [Theory of electricity]. Moscow; Leningrad, GONTI NKTP SSSR Publ., 1939, 259 p.

11. Idel'son N. I. *Teoriya potentsiala i ee prilozhenie k voprosam geofiziki* [The theory of potential and its application in geophysics]. Moscow; Leningrad, GTTI Publ., 1932, 348 p.

12. Sokolnikov V. V. *Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva* [Modeling of organizational and technological reliability of construction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 4 (69), pp. 92–97.

13. Yudina A. F., Verstov V. V., Bad'in G. M. *Tekhnologicheskie protsessy v stroitel'stve* [Technological processes in construction]. Moscow, Akademiya Publ., 2013, 304 p.