

## ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ ПО КРИТЕРИЮ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ

**А.В. Киянец**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Являясь одним из технико-экономических показателей календарного плана, коэффициент неравномерности трудовых ресурсов (коэффициент неравномерности движения рабочих)  $k_n$  отражает распределения трудовых ресурсов по времени, отвечает за оптимизацию и регулирование сроков строительства, является основой для расчета количества временных зданий на строительной площадке, что в свою очередь определяет потребность в площади на размещение этих зданий на строительной площадке. Проблема заключается в отсутствии в общедоступных источниках обоснованных данных значений данного коэффициента, а также нормативных требований по его ограничению и расчету. Для решения данной проблемы предложена новая методика определения максимального значения  $k_n$  исходя из проектируемой или требуемой продолжительности установившегося потока при поточном методе производства работ. Для этого было проведено математическое моделирование различных вариантов эпюр графика движения рабочих при фиксировании значений продолжительности и трудоемкости. Данное вариантное моделирование позволило получить зависимость  $k_n$  от времени установившегося потока. Определена математическая зависимость для назначения предельного  $k_n$  в период времени установившегося потока, равная от 25 до 100 % от полной продолжительности работ, что позволяет динамически изменять  $k_n$  в зависимости от конкретных условий проектирования календарного плана и общей организации и управления строительным проектом.

*Ключевые слова:* календарный план, график движения рабочей силы, коэффициент неравномерности трудовых ресурсов, коэффициент неравномерности движения рабочей силы, диаграмма Ганта, проект организации строительства, проект производства работ, управление строительным проектом.

### Введение

Календарный план (КП) вместе со строительным генеральным планом (СГП) является одним из основных документов в составе проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР) и определяет порядок и взаимную увязку по времени этапов строительства, а также отдельных видов работ. Ограничение реализации строительного проекта по времени, случайный и не прогнозируемый характер многих факторов влияния в строительстве делает календарный план незаменимым для организации, планирования и управления строительным производством. Обязательное наличие календарного плана регламентировано требованиями СП 48.13330.2019 «СНиП 12-01-2004 Организация строительства», там же приведены определение календарного плана и графика производства работ, а также форма их представления [1]:

– календарный план работ – график производства работ с осуществленной привязкой к действующему производственному календарю;

– график движения трудовых ресурсов – один из видов ресурсных графиков, позволяющих моделировать распределение трудовых ресурсов

по времени между работами и объектами с возможностью последующей оптимизации режима пользования установленными методиками;

– график производства работ – инструмент моделирования строительного производства в виде кусочно-постоянных (кусочно-заданных) функций, изображающих на временной шкале последовательность и сроки выполнения работ с максимально возможным их совмещением (линейная диаграмма Ганта).

Являясь одним из технико-экономических показателей календарного плана, коэффициент неравномерности движения рабочих  $k_n$  отражает распределения трудовых ресурсов по времени, отвечает за оптимизацию и регулирование сроков строительства, является основой для расчета количества временных зданий на строительной площадке, что в свою очередь определяет потребность в площади на размещение этих зданий на строительной площадке [2].

Таким образом, график движения трудовых ресурсов является важнейшим инструментом при оптимизации и изменении календарного плана. Общепринятым показателем правильности принятых организационно-технологических решений и

маркером эффективности построенного графика служит коэффициент неравномерности движения трудовых ресурсов ( $k_n$ ), получаемый как отношение максимального количества привлеченных работников ( $N_{\max}$ ) к их среднему значению ( $N_{\text{ср}}$ ), которое в свою очередь находится как отношение общей трудоемкости всех работ графика ( $Q$ ) к максимальной продолжительности ( $T$ ):

$$k_n = N_{\max} / N_{\text{ср}} = (N_{\max} \cdot T) / Q. \quad (1)$$

Чем больше коэффициент неравномерности, тем более сложно организовать строительство, так как необходимо решать комплекс организационно-технологических и правовых вопросов по привлечению дополнительного количества работников требуемой профессии и квалификации, и, наоборот, по переводу их на другие объекты, виды деятельности и т. д. [3, 4].

В идеальном случае  $k_n = 1$ , что означает неизменность числа привлекаемых работников на время производства работ. Теоретически такое возможно только в ряде работ, ограниченных каким-либо этапом строительства при возведении одного здания, например, при возведении «коробки» здания, или при возведении комплекса однотипных зданий параллельным способом. Но в реальной строительной практике такое редко встречается. Поэтому нижней границей коэффициента неравномерности является 1, верхняя граница является объектом ограничения. В различных источниках приводятся разные значения коэффициента неравномерности движения трудовых ресурсов от 1,3 до 2,0 в зависимости от вида строительства (новое или реконструкция) и взглядов автора на данный вопрос [5–8]. Проблема заключается в том, что авторами не приводятся ни обоснование данных значений коэффициента, ни ссылки на первоис-

точник. Усложняет процесс работы по оптимизации графика движения трудовых ресурсов и отсутствие нормативных значений коэффициента неравномерности, кроме некоторых упоминаний вскользь [9]. Таким образом, целью данной работы является предложение методологических основ определения граничных значений коэффициента неравномерности движения трудовых ресурсов как индикатора качества построения календарного плана (графика производства работ) с позиции оптимального потребления и распределения по времени рабочих и инженерных кадров.

### Методы

Исследуя данную проблему, необходимо прежде всего отметить, что неравномерное потребление ресурсов, в том числе и трудовых, является особенностью именно поточного метода производства работ (рис. 1) [10]. В этом случае максимальное количество потребляемых ресурсов наблюдается в момент установившегося потока, т. е. когда наблюдается одновременная работа всех частных потоков [11–13]. Или, как вариант, пиковое значение на эпюре движения рабочих может быть при одновременном производстве работ потоками с наибольшим количеством занятых людей [14, 15]. Для наглядности рассмотрим случай ритмичных потоков с равными и кратными изменениями ритма. Поскольку в реальных условиях трудоемкость ( $Q$ ) строительства объекта не зависит от выбранного способа организации работ, а продолжительность ( $T$ ) определяется нормативно или условиями договора, то зададим эти параметры неизменными ( $Q, T = \text{const}$ ). Тогда, варьируя параметрами интенсивности потока и количества привлеченных трудовых ресурсов, получим типовые эпюры движения рабочих (рис. 2).

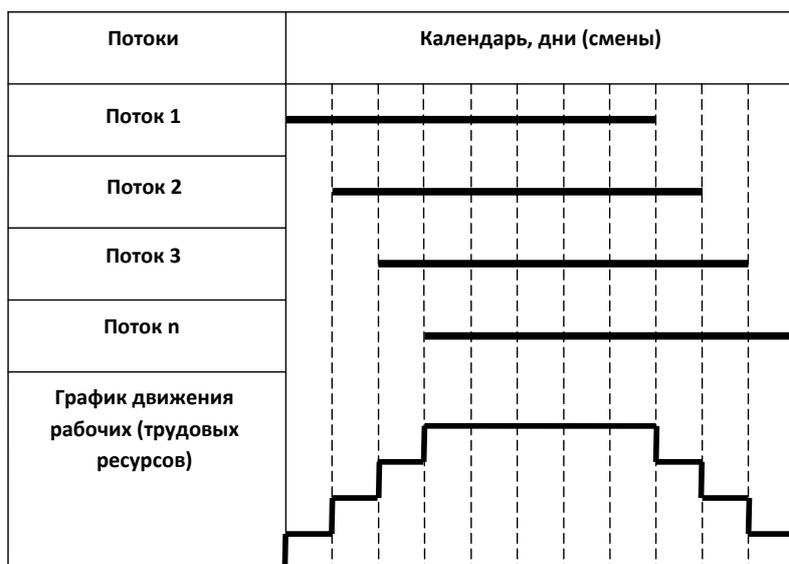


Рис. 1. Пример графика движения трудовых ресурсов при поточном методе организации работ с ритмичными потоками с равными и кратными изменениями ритма

**Результаты и обсуждение**

По результатам моделирования видно, что  $k_n$  хотя и описывает общую неравномерность потребления ресурсов, не учитывает интенсивность потока и характер совмещения частных потоков. Это иллюстрируют графики, где коэффициент неравномерности  $k_n = 1,5$ , а время установившегося потока (верхняя часть графика) на графике (рис. 2 б) составляет  $0,25T$ , а на графике (рис. 2 в) –  $0,5T$ . Конечно, рассматривая более сложные виды графиков, можно привести еще большее количество таких примеров, что отмечалось и в работах других авторов [16, 17].

Еще одной проблемой, как уже упоминалось, является назначение верхних границ коэффициента неравномерности движения рабочей силы. Таким образом, логичным было бы решение о его динамическом изменении в зависимости от различных факторов. В частности, ввести зависи-

мость значения  $k_n$  от проектируемого времени установившегося потока. Такое решение позволит более гибко подходить к процессу расчета и составления календарного плана, с одной стороны, и, с другой стороны, позволит сохранить изменчивость потребления трудовых ресурсов в разумных пределах. Что косвенно подтверждают и другие исследования [18–20]. Для этого было произведено математическое моделирование по определению зависимости  $k_n$  от  $k_y$ , где  $k_y$  – коэффициент времени установившегося потока, определяющийся как

$$k_y = T_y/T, \tag{2}$$

где  $T_y$  – время установившегося потока,  $T$  – общая продолжительность работ по графику.

По результатам моделирования построен график искомой зависимости в пределах изменения  $k_y$  от 0,25 до 1,0 (рис. 3).

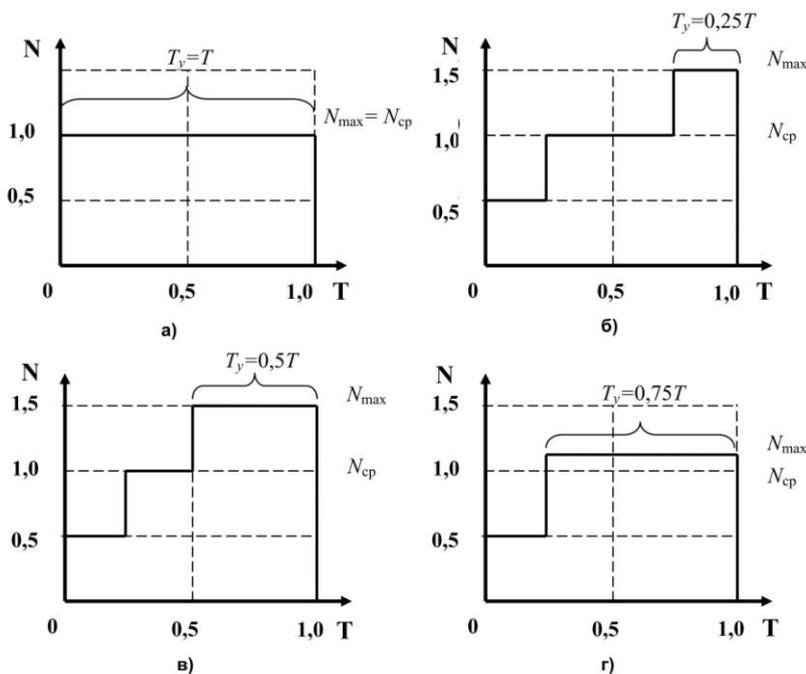


Рис. 2. Отдельные эпюры графиков движения трудовых ресурсов с различным значением времени установившегося потока при постоянной трудоемкости и продолжительности производства работ



Рис. 3. Зависимость коэффициента неравномерности трудовых ресурсов от коэффициента времени установившегося потока

По результатам исследования была получена зависимость:

$$k_n = k_y^2 - 2,55k_y + 2,56. \quad (3)$$

Интервал изменения  $k_y$  от 0 до 0,25 в принятых ограничениях исследования стабильно дает показатели  $k_n \geq 2$ , что сказывается на значительной неравномерности потребления трудовых ресурсов, поэтому он был исключен из дальнейшего рассмотрения [21].

### Выводы

Коэффициент неравномерности движения трудовых ресурсов является важнейшим показателем правильности и оптимальности составленного календарного плана (графика производства работ) как составной части проекта организации строительства и проекта производства работ. Применяемые на сегодняшний день границы назначения  $k_n$  являются фиксированными и недостаточно обоснованными.

Предложена новая методика определения максимального значения  $k_n$  исходя из проектируемой или требуемой продолжительности установившегося потока при поточном методе производства работ. Определена математическая зависимость для назначения предельного  $k_n$  в период времени установившегося потока, равная от 25 до 100 % от полной продолжительности работ.

### Литература

1. СП 48.13330.2019 «СНиП 12-01-2004. Организация строительства».
2. Korol, O. Factors affecting the consumption of fuel and energy resources during the construction of monolithic buildings / O. Korol // *E 3S Web of Conferences: TPACEE-2019*. – 2020. – Vol. 164. – № 08020.
3. Ekindt, V.T. *Multicriteria Scheduling – Theory, Models and Algorithms (Second Edition)* / V.T. Ekindt, J.-C. Billaut. – Berlin: Springer, 2006. – 577 p.
4. Lucko, G. Temporal constraints in linear scheduling with singularity functions: Case of calendarization / G. Lucko // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 28. – P. 232–243.
5. Дикман, Л.Г. Организация строительного производства / Л.Г. Дикман. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 626 с.
6. Курнев, А.Д. Организация в строительстве / А.Д. Курнев. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2020. – 528 с.
7. Рыжневская, М.П. Организация строительного производства / М.П. Рыжневская. – Минск: РИПО, 2019. – 308 с.
8. Олейник, П.П. Организация строительного производства: подготовка и производство строительного монтажа работ / П.П. Олейник, В.И. Бродский. – 2-е изд. – М.: МИСИ – МГСУ, 2020. – 96 с.
9. Пособие по разработке проектов организации строительства и проектов производства работ для жилищно-гражданского строительства (к СНиП 3.03.01-85) / ЦНИИОМТП. – М.: Стройиздат, 1989. – 160 с.
10. Ammar M.A. Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cash flows / M.A. Ammar // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2011. – Vol. 137 – P. 65–71.
11. Карякин, А.М. Интерактивная процедура многокритериальной оптимизации при составлении календарных планов / А.М. Карякин, В.В. Березка // *Вестник ИГЭУ*. – 2013. – № 2. – С. 1–4.
12. Мищенко, В.Я. Оптимизация календарного плана строительного производства путем перераспределения нескладируемых ресурсов / В.Я. Мищенко, М.Г. Добросоцких, Е.Э. Эрсбурн // *Недвижимость: экономика, управление*. – 2019. – № 1. – С. 83–87.
13. Reprofiling of transport infrastructure objects with monolithic reinforced concrete frame / D. Topchiy, A. Bolotova, A. Vorobev, A. Atamanenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 918. – № 012025.
14. Мищенко, В.Я. Оптимизация календарного плана строительного производства на основе учета пространственно-технологических связей / В.Я. Мищенко, М.А. Преображенский, М.Г. Добросоцких // *Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур – Safety 2018: сб. ст. – Екатеринбург: НИЦ «Нур БСМ» УрО РАН; УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 164–172.*
15. Малкин, М.М. Оптимизация графиков движения рабочих в календарных планах методом вариации ресурсных профилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.М. Малкин. – СПб.: Изд-во СПбГАСУ. 2010. – 15 с.
16. Optimal order of construction of facilities in complex development with minimal additional costs / A. Mailyan, E. Korol, R. Petrosyan, D. Antoniadi // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering, MPCPE 2020*. – 2020. – Vol. 896. – № 012052.
17. Kuzhin M. Optimization of construction parameters using resource scheduling / M. Kuzhin, M. Akimockina // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 97. – № 06030.
18. Anisimov, V. Model and Algorithm for Substantiating Solutions for Organization of High-Rise Construction Project / V. Anisimov, E. Anisimov, A. Chernysh // *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on High-Rise Construction, HRC 2017*. – 2018. – Vol. 33. – № 030032017.
19. Pocebneva, I. Models of resource planning during formation of calendar construction plans for erection of high-rise buildings / I. Pocebneva, V. Belousov, I. Fateeva // *E3S Web of Conferences*:

*International Scientific Conference on High-Rise Construction, HRC 2017. – 2018. – Vol. 33. – № 030032017.*

20. Formation of optimal performance of works during establishment of the complex of objects optimal sequence of establishing objects complex building / A. Mailyan, G. Afanasiev, D. Antoniadi, R. Petrosyan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production*

*Engineering, MPCPE 2020. – 2020. – Vol. 896. – № 012053.*

21. Lapidus, A. Construction project organizational and technological parameters analysis / A. Lapidus, M. Kuzhin, I. Shesterikova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: Construction – The Formation of Living Environment, FORM 2020. – 2020. – Vol. 869. – № 07204723.*

**Киянец Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kiyanets2007@mail.ru

Поступила в редакцию 17 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/build210303

## OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION SCHEDULE ON THE CRITERION OF INEQUALITY IN THE DISTRIBUTION OF LABOR FORCES

**A.V. Kiyanets**, kiyanets2007@mail.ru  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Being one of the technical and economic indicators of construction schedule, the coefficient of inequality in the distribution of labor forces (coefficient of uneven labor movement)  $k_{um}$  reflects the distribution of labor forces over time, is responsible for the optimization and regulation of construction period, is the basis for calculating the number of temporary buildings on a construction site, followed by the need for space for these buildings at a construction site. The problem resides in the absence in the publicly available sources of substantiated data on the values of this coefficient and regulatory requirements for its limitation and calculation. To solve this problem, a new method for determining the maximum value of  $k_{um}$  based on the projected or required duration of the steady-state flow in the flow line manufacturing is proposed. For this, mathematical modelling of multiple variants of labor movement diagrams is carried out while fixing the values of duration and labor intensity. This variant modelling makes it possible to obtain the dependence of  $k_{um}$  on the steady-state flow time. The mathematical dependence for assigning the limiting  $k_{um}$  within the time of the steady-state flow equal to from 25 to 100 % of the total duration of the work is determined, which allows dynamically changing  $k_{um}$  depending on the specific conditions for the design of the construction schedule and the general organization and management of the construction project.

*Keywords: construction schedule, labor movement diagram, coefficient of inequality in the distribution of labor resources, Gantt chart, construction organization project, manufacturing project, construction project management.*

### References

1. SP 48.13330.2019 “SNiP 12-01-2004 Organizatsiya stroitel’stva” [Set of Rules 48.13330.2019 “SNiP 12-01-2004 Organization of construction”].
2. Korol O. [Factors Affecting the Consumption of Fuel and Energy Resources During the Construction of Monolithic Buildings]. [E3S Web of Conferences: TPACEE-2019], 2020, vol. 164, no. 08020. DOI: 10.1051/e3sconf/202016408020.
3. Ekindt V.T., Billaut J.-C. [Multicriteria Scheduling – Theory, Models and Algorithms (Second Edition)]. Berlin, Springer, 2006. 577 p.
4. Lucko G. [Temporal Constraints in Linear Scheduling with Singularity Functions: Case of Calendarization]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, vol. 28, pp. 232-243. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000268.
5. Dikman L.G. *Organizatsiya stroitel’nogo proizvodstva* [Organization of Construction Production]. Moscow, Izdatel’stvo Assotsiatsii stroitel’nykh vuzov Publ., 2006. 626 p.

6. Kirnev A.D. *Organizatsiya v stroitel'stve* [Organization in Construction]. St. Petersburg, Lan', 2020. 528 p.
7. Ryzhevskaya M.P. *Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva* [Organization of Construction Production]. Minsk, RIPO Publ., 2019. 308 p.
8. Oleynik P.P., Brodskiy V.I. *Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva: podgotovka i proizvodstvo stroitel'no-montazhnykh rabot* [Organization of Construction Production: Preparation and Production of Construction and Installation Works]. Moscow. MISI – MGSU Publ., 2020. 96 p.
9. *Posobiye po razrabotke proyektov organizatsii stroitel'stva i proyektov proizvodstva rabot dlya zhilishchno-grazhdanskogo stroitel'stva (k SNIp 3.03.01-85) TsNIIOMTP* [Manual for the Development of Projects for the Organization of Construction and Projects for the Production of Work for Housing and Civil Construction (to SNIp 3.03.01-85)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 160 p.
10. Ammar M.A. [Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cash flows]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, vol. 137, pp. 65–71.
11. Karyakin A.M., Berezka V.V. [Interactive Procedure of Multicriteria Optimization in the Preparation of Calendar Plans]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISEU]. Ivanovo, 2013, no. 2, pp. 1–4. (in Russ.)
12. Mishchenko V.Ya., Dobrosotkikh M.G., Ersburn E.E. [Optimization of the Construction Production Schedule by Means of Redistribution of Non-Stockpiled Resources]. *Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [International Scientific and Technical Journal]. 2019, no. 1, pp. 83–87. (in Russ.)
13. Topchiy D., Bolotova A., Vorobev A., Atamanenko A. [Reprofiling of Transport Infrastructure Objects with Monolithic Reinforced Concrete Frame]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 918, no. 012025.
14. Mishchenko V.Ya., Preobrazhenskiy M.A., Dobrosotkikh M.G. [Optimization of the Construction Production Schedule Based on the Accounting of Spatial and Technological Connections]. *Bezopasnost' kritichnykh infrastruktur i territoriy. Problemy bezopasnosti stroitel'nykh kritichnykh infrastruktur – Safety 2018: sbornik statey* [Safety of Critical Infrastructures and Territories. Safety Problems of Critical Building Infrastructures – Safety 2018]. Ekaterinburg, 2018, pp. 164–172. (in Russ.)
15. Malkin M.M. *Optimizatsiya grafikov dvizheniya rabochikh v kalendarnykh planakh metodom variatsii resursnykh profiley. Avtoref. kand. diss.* [Optimization of the Schedules of Workers' Movement in the Schedules by the Method of Variation of Resource Profiles. Abstract of cand. sci. diss.]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2010. 15 p.
16. Mailyan A., Korol E., Petrosyan R., Antoniadi D. [Optimal Order of Construction of Facilities in Complex Development with Minimal Additional Costs]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering, MPCPE 2020*, 2020, vol. 896, no. 012052.
17. Kuzhin M., Akimockina M. [Optimization of Construction Parameters Using Resource Scheduling]. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 97, no. 06030. doi: 10.1051/e3sconf/20199706030.
18. Anisimov V., Anisimov E., Chernysh A. [Model and Algorithm for Substantiating Solutions for Organization of High-Rise Construction Project]. *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on High-Rise Construction, HRC 2017*, 2018, vol. 33, no. 030032017. DOI: 10.1051/e3sconf/20183303003.
19. Pochneva I., Belousov V., Fateeva I. [Models of Resource Planning During Formation of Calendar Construction Plans for Erection of High-Rise Buildings]. *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on High-Rise Construction, HRC 2017*, 2018, vol. 33, no. 030032017. DOI: 10.1051/e3sconf/20183303032.
20. Mailyan A., Afanasiev G., Antoniadi D., Petrosyan R. [Formation of Optimal Performance of Works During Establishment of the Complex of Objects Optimal Sequence of Establishing Objects Complex Building]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering, MPCPE 2020*, 2020, vol. 896, no. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012053.
21. Lapidus A., Kuzhin M., Shesterikova I. [Construction Project Organizational and Technological Parameters Analysis]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: Construction - The Formation of Living Environment, FORM 2020*, 2020, vol. 869, no. 07204723. DOI: 10.1088/1757-899X/869/7/072047.

Received 17 March 2021

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Киянец, А.В. Оптимизация календарных планов по критерию неравномерности трудовых ресурсов / А.В. Киянец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 23–28. DOI: 10.14529/build210303

### FOR CITATION

Kiyanets A.V. Optimization of Construction Schedule on the Criterion of Inequality in the Distribution of Labor Forces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 3, pp. 23–28. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210303