

FTAMP 73.49.99

К.Г. Балабекова¹ – негізгі автор, | ©
А.Б. Тулеков², Р.Л. Сахапов³¹PhD, қауымдас. профессор, ²Докторант, ³Техн. ғылым. канд., профессор

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-8242-6675> ²<https://orcid.org/0009-0002-3563-2035>³<https://orcid.org/0000-0001-9665-1251>^{1,2}Л.Н.Гумилев ат. Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан³Казан федералды университеті, Казан, Ресей²tulekov_ab@enu.kz<https://doi.org/10.55956/KETX8183>

ТҰРАҚТЫЛЫҚТЫ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ҮШІН МҰНАРА КРАНДАРЫН ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Бұл жұмыста мұнара крандарының тұрақтылығын қамтамасыз етуге арналған есептеу әдістемесі әзірленді. Әдістеме кранның жұмыс режиміндегі негізгі әсер етуші факторларды – көтерілетін жүк, жел жүктемесі, динамикалық күштер, кранның өз салмағы және тірек шарттарын – кешенді ескеруге мүмкіндік береді. Сандық модельдеу нәтижелері бойынша кранның орын ауыстырулары, эквивалентті кернеулері, тірек реакциялары және тұрақтылықты жоғалту формалары зерттелді. Жүктеме-орын ауыстыру диаграммасы арқылы критикалық жүктеме мен тұрақтылық шегі дәл анықталды, ал тұрақтылық коэффициентінің жебе ұзындығына тәуелділігі қауіпті жұмыс режимдерін алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. ANSYS-та зерттеу әдістемесі бойынша есептеу жұмыстары жасалды. Ұсынылған әдістеме мұнара крандарын жобалау, монтаждау және пайдалану кезеңдерінде қолдануға арналған және құрылыс жұмыстарының қауіпсіздік деңгейін арттыруға бағытталған.

Тірек сөздер: мұнара крандары, тұрақтылық, аударылу сәті, сандық модельдеу, жүктеме, ANSYS.



Балабекова, К.Г., Тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін мұнара крандарын есептеу әдістемесін әзірлеу / К.Г. Балабекова, А.Б. Тулеков, Р.Л. Сахапов // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2026. – №1(91). – Б.464-471.
<https://doi.org/10.55956/KETX8183>

Кіріспе. Қазіргі заманғы құрылыс өндірісінде мұнара крандары көп қабатты үйлер мен күрделі инженерлік құрылыстарды салудың ажырамас бөлігі болып табылады. Олар құрылыс материалдары мен құрылымдарының көтерілуі мен қозғалысын қамтамасыз етеді, бұл еңбек өнімділігін арттыруға және құрылыс мерзімдерін қысқартуға ықпал етеді. Мұнара крандарының сенімді және қауіпсіз жұмысы құрылыс процесінің тиімділігіне, өнеркәсіптік қауіпсіздік деңгейіне және салынып жатқан нысандардың сапасына тікелей әсер етеді.

Мұнара крандарын пайдаланудағы негізгі міндеттердің бірі олардың тұрақтылығын қамтамасыз ету болып табылады. Тұрақтылықтың жеткіліксіздігі Кранның аударылуына, төтенше жағдайларға, айтарлықтай материалдық шығындарға және адамдардың өмірі мен денсаулығына қауіп төндіруі мүмкін. Мұнара крандарының тұрақтылығына жел жүктемелері,

көтерілетін Жүктің массасы мен жағдайы, Кранның құрылымдық параметрлері, сондай-ақ негіздің сипаттамалары мен оны орнату шарттары айтарлықтай әсер етеді.

Қолданыстағы нормативтік құжаттар мен мұнара крандарының тұрақтылығын есептеу әдістері, әдетте, пайдаланудың типтік жағдайларына бағытталған. Алайда, ғимараттардың биіктігінің артуымен, құрылыс алаңдарының күрделенуімен және крандардың жұмыс режимдерінің әртүрлілігімен сипатталатын қазіргі заманғы құрылыс жағдайында пайдалану және сыртқы факторлардың жиынтық әсерін ескеретін дәлірек және әмбебап есептеу техникасын жасау қажет.

Осыған байланысты мұнара крандарын олардың тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін есептеу әдістемесін әзірлеу өзекті ғылыми-техникалық міндет болып табылады. Бұл жұмыстың мақсаты – мұнара крандарының тұрақтылығын олардың қауіпсіз және сенімді жұмысына әсер ететін негізгі факторларды ескере отырып бағалауға мүмкіндік беретін есептеу әдісін жасау. Ұсынылған техниканы мұнара крандарын жобалау, монтаждау және пайдалану кезеңдерінде қолдануға болады және құрылыс жұмыстарының қауіпсіздік деңгейін арттыруға ықпал етеді.

Әртүрлі жұмыс режимдерінде мұнара крандарының тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін негізгі жүктемелер мен құрылымдық параметрлердің олардың тұрақтылығына әсерін сандық бағалауға мүмкіндік беретін негізделген инженерлік есептеулер жүргізу қажет. Мұндай есептеу нормативтік талаптарды да, құрылыс алаңында кранды пайдаланудың нақты жағдайларын да ескеруі керек.

Мұнара крандарының тұрақтылығын есептеу әдістемесін әзірлеу қолданыстағы нормативтік құжаттарды талдауды, тұрақтылыққа әсер ететін негізгі факторларды анықтауды, сондай-ақ есеп айырысу схемасын қалыптастыруды және қолданыстағы жүктемелер мен күштердің үйлесімін анықтауды қамтитын жүйелі тәсілді қажет етеді. Желдің әсеріне, кранның және көтерілетін жүктің өз салмағынан түсетін жүктемелерге, сондай-ақ бекіту шарттары мен негіздің сипаттамаларына ерекше назар аудару керек.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Осы жұмыста көрсетілген факторларды талдау негізінде мұнара кранының тұрақты тепе-теңдік шарттарын анықтауға және неғұрлым қолайсыз есептік жағдайларда тұрақтылық қорын бағалауға мүмкіндік беретін есептеу әдістемесі ұсынылады. Бұл әдістемені қолдану аударылып кетудің алдын алуға және құрылыс жұмыстарының қауіпсіздігін арттыруға бағытталған Кранның конструктивті және пайдалану параметрлерін негізделген таңдау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

1. Мұнаралы кран өзінің орнықтылығын жоғалтады – аударылатын сәт \geq ұстап тұрған сәт.

$$M_a \geq M_v.$$

2. Көтерілетін жүктің салмағын және моментін анықтау:

$$F_{ж} = m_{ж} \cdot g,$$

$$M_{ж} = F_{ж} \cdot L.$$

мұндағы: $m_{ж}$ – жүк салмағы; L – жебенің ұшуы.

Әрбір элемент ұстау немесе аудару сәтін жасайды:

$$M_{ж} = \sum(G_i \cdot a_i)$$

мұндағы: G_i – элементтің салмағы; a_i – аударылу нүктесіне қатысты иық.

1. Бастапқы деректерді анықтау

Есептеуді бастамас бұрын мынаны көрсету керек:

1) Геометриялық параметрлер: мұнара биіктігі H , жебе ұзындығы L , қарсы салмақ позициясы $a_{ай}$.

2) Массалар: $m_{ж}$ салмағы, Жебе мен мұнараның массасы $m_{жу}$, қарсы салмақ $m_{қ}$.

3) Нормативтік жүктемелер: жел қысымы $w(z)$, қар, жүктің қозғалысынан динамикалық жүктеме.

4) Материалдың қасиеттері: аққыштық шегі σ_T , серпімділік модулі E , тығыздық ρ .

2. Аударылу сәтін есептеу

Тұрақтылықтың негізгі критерийі:

$$M_0 = M_{ж} + M_{жел} + M_{дина}$$

Жүктің сәті:

$$M_{ж} = m_{ж}g \cdot L.$$

Жел сәті:

$$M_{жел} = \int_0^H w(z)b(z)zdz.$$

Динамикалық момент (жүктің инерциясы):

$$M_{дина} = \varphi \cdot m_{ж}g \cdot L.$$

3. Ұстау моментін есептеу

$$M_u = M_p + M_c.$$

Қарсы салмақ:

$$M_p = m_p g \cdot a_p$$

Кранның өз салмағы:

$$M_o = \sum_i m_i g \cdot a_i.$$

4. Тұрақтылықты тексеру

Қор коэффициентін ескере отырып, тұрақтылық шарты $K_{\delta an}$:

$$\frac{M_u}{M_a} \geq K_z$$

мұндағы: K_z = жұмыс күйі үшін 1.15 – 1.3, жұмыс істемейтін (дауыл) үшін 1.4 – 1.6.

5. Негізге қысымды есептеу

$$q_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

мұндағы: N – жалпы тік күш; A – тірек алаңы; M – аудару сәті; W – негіздің қарсылық моменті.

Шарт:

$$q_{max} \leq q_{k.g.}$$

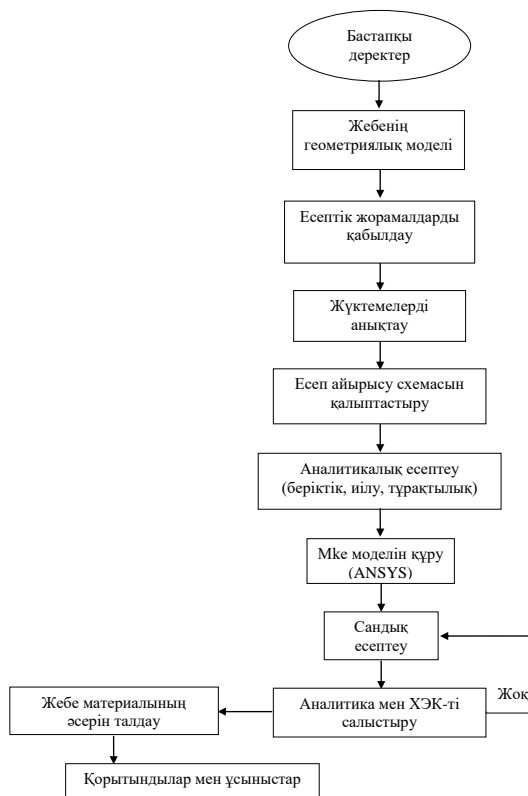
6. Геометриялық сызықтық емес

Үлкенмещысулар P - Δ әсерін ескереді:

$$M_{tot} = M_a + P \cdot \Delta$$

мұндағы: P – мұнарадағы бойлық күш; Δ – шыңның көлденеңмещысуы.

Тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін мұнара крандарын есептеу әдістемесін сурет 1 көрсетілген.



Сурет 1. Зерттеу әдістемесі

Зерттеу әдістемесінің негізінде мұнаралы кранның орнықтылығы зерттелді.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Конструкцияның орын ауыстырулары (деформациялар). Жүктеме әсерінен мұнара кранының жалпы деформациялық күйі оның кеңістіктік қаттылығын сипаттайды. Орын ауыстырулар картасы мұнара мен жебенің нақты иілуін көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік береді, сондай-ақ жүктеме артқан кездегі конструкцияның жұмыс қабілетін бағалауға жағдай жасайды.

Жүктеменің салыстырмалы түрде аз ұлғаюы кезінде орын ауыстырулардың күрт өсуі конструкцияның тұрақтылықты жоғалту шегіне жақындағанын көрсетеді. Сонымен қатар алынған мәндер рұқсат етілген ауытқулармен салыстырылып, нормативтік талаптардың сақталуы тексеріледі. Осылайша, орын ауыстырулар конструкцияның жаһандық қаттылығының негізгі көрсеткіші болып табылады (сурет 2а).

Эквивалентті кернеулер (von Mises stress). Эквивалентті кернеулердің таралу картасы металл элементтерінің ең жоғары жүктелген аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді. Әдетте бұл аймақтар мұнараның төменгі бөлігінде, іргетаспен түйісу нүктелерінде және жебенің бекіту тораптарында шоғырланады.

Алынған кернеу мәндері беріктік шарты бойынша бағаланады:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_{\text{yield}}}{n}$$

мұндағы σ_{yield} – материалдың ағу шегі; n – беріктік қоры коэффициенті. Бұл талдау конструкцияның қай бөліктерін күшейту қажеттігін анықтауға мүмкіндік береді. Айта кету керек, эквивалентті кернеулер аударылу қаупін емес, материалдың бұзылу ықтималдығын сипаттайды (сурет 2б).

Тіректердегі реакциялар (қолдау реакциялары). Кранның жалпы тұрақтылығын бағалауда тірек реакциялары шешуші рөл атқарады. Бұл көрсеткіш жүктеменің тіректер арасында қалай қайта бөлінетінін көрсетеді.

Егер белгілі бір тіректегі реакция нөлге тең немесе теріс мәнге ие болса, бұл тіректің ажырауын білдіреді. Мұндай жағдай краның аударылу процесінің басталуын тікелей сипаттайтын белгі болып табылады. Сондықтан дәл тірек реакцияларының өзгеруі үлкен кернеулерге қарағанда тұрақтылықтың жоғалуын неғұрлым нақты көрсетеді (сурет 2с).

Тұрақтылықты жоғалту формасы (buckling mode)

Тұрақтылықты жоғалту формалары краның апаттық жағдайға қандай механизм арқылы өтетінін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл жалпы мұнараның көлбеюі, жебенің иілуі немесе жекелеген секциялардың жергілікті орнықсыздығы болуы мүмкін.

Талдау нәтижесінде тұрақтылық коэффициенті λ анықталады:

$\lambda > 1$ – тұрақтылық қоры бар;

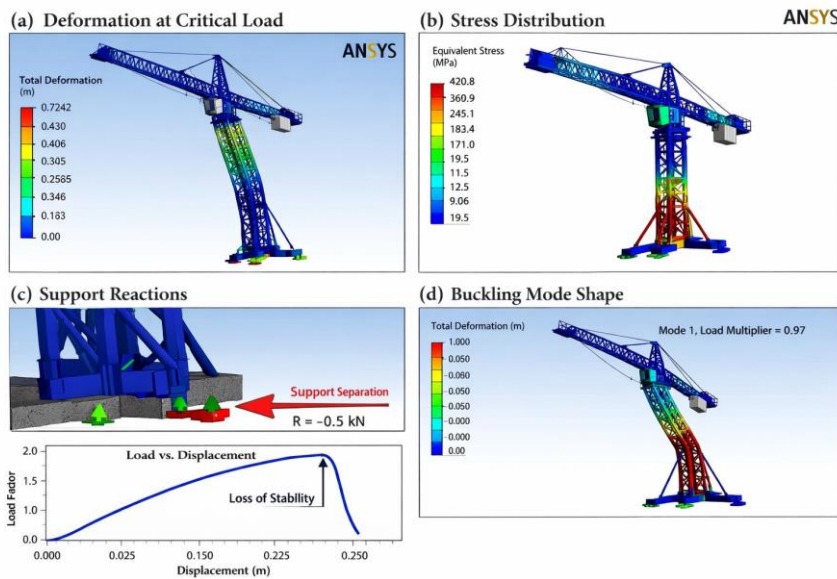
$\lambda \approx 1$ – конструкция шекті күйде.

Осы көрсеткіш ықтимал апаттық сценарийді болжауға және қауіпті режимдерді алдын ала анықтауға мүмкіндік береді (сурет 2д).

«Жүктеме-орын ауыстыру» тәуелділігі. Кран конструкциясының мінез-құлқын терең түсінудің негізгі құралы – «жүктеме-орын ауыстыру» диаграммасы. Диаграмманың бастапқы бөлігінде қисықтың бірқалыпты өсуі жүйенің тұрақты күйін сипаттайды.

Қисықтың ең жоғарғы нүктесі критикалық жүктемеге сәйкес келеді. Осы нүктеден кейін жүктеме артпай-ақ орын ауыстырулардың күрт өсуі байқалса, бұл конструкцияның тұрақтылықты жоғалтқанын көрсетеді (сурет 2г).

Осылайша, аталған диаграмма кранның критикалық күйін дәл анықтауға мүмкіндік беретін ең сенімді көрсеткіштердің бірі болып табылады.

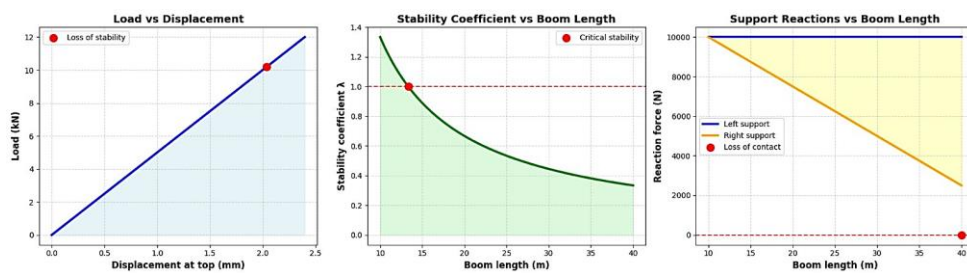


Сурет 2. Кранның құрылымдық талдауы

Кран шыңыныңмещысуы жүктеме кезінде қалай өсетінін көрсетеді, қызыл нүктелі сызық тұрақтылықтың жоғалуына жақындағанын көрсетеді.

Тұрақтылық коэффициенті – тұрақтылық коэффициенті жебенің көтерілуімен төмендейді; қызыл сызық $\lambda=1$ критикалық нүктені көрсетеді.

Тіректердің бірінің реакциясы жебенің көтерілуімен азаяды; нөлдік қиылысу тіректің ықтимал бөлінуін көрсетеді (сурет 3).



Сурет 3. Мұнаралы кранға түсетін әсер

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу нәтижесінде мұнара крандарының тұрақтылығын қамтамасыз етуге арналған есептеу әдістемесі әзірленді. Ұсынылған әдістеме кранның жұмыс істеуінің әртүрлі режимдерінде тұрақтылыққа әсер ететін негізгі факторларды кешенді түрде ескеруге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, көтерілетін жүктеменің әсері, жел жүктемелері, динамикалық факторлар, кранның өз салмағы, қарсы салмақтың әсері және тірек шарттары есепке алынды.

Әдістеме негізінде аударылу және ұстау моменттерінің арақатынасы анықталып, тұрақтылықтың нормативтік талаптарға сәйкестігі бағаланды. Сонымен қатар тірек реакцияларын талдау арқылы тіректердің ажырау қаупі

мен аударылудың басталу сәтін анықтау мүмкіндігі көрсетілді. Геометриялық сызықтық емес әсерлерді (P–Δ әсері) ескеру кран конструкциясының нақты жұмыс істеу жағдайын дәлірек сипаттауға мүмкіндік берді.

Сандық модельдеу нәтижелері орын ауыстырулардың, эквивалентті кернеулердің, тірек реакцияларының және тұрақтылықты жоғалту формаларының кранның орнықтылық күйін бағалаудағы маңызын көрсетті. «Жүктеме–орын ауыстыру» диаграммасы арқылы кранның критикалық күйі мен тұрақтылықты жоғалту шегі дәл анықталатыны дәлелденді. Ал тұрақтылық коэффициентінің жебе ұзындығына тәуелділігі кранның қауіпті жұмыс режимдерін айқындауға мүмкіндік берді.

Осылайша, ұсынылған есептеу әдістемесі мұнара крандарының тұрақтылығын сенімді бағалауға, апаттық жағдайлардың алдын алуға және конструктивтік әрі пайдалану параметрлерін негізделген түрде таңдауға мүмкіндік береді. Әдістеме мұнара крандарын жобалау, монтаждау және пайдалану кезеңдерінде қолдануға жарамды және құрылыс жұмыстарындағы қауіпсіздік деңгейін арттыруға бағытталған практикалық маңызға ие.

Әдебиеттер тізімі

1. Kang H., Gao J., Wang S., Zhou K., Huang C. Research on Stability of Tower Crane based on ANSYS Software // *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*. – 2024. – Vol. 12. – P. 45-58.
2. Ivanenko M., Musaev Z.R. Use of 3D Model in the Study of Tower Crane Stability. – Kharkov, 2015. – 12 p.
3. Dzerzhynskiy I., Stefanov V. Exploring the Stability of Tower Cranes and Methods for Improving Their Operational Safety. – Kyiv, 2025. – 18 p.
4. Zhang Y. Stability Study of Wind Turbine Tower Cranes // *Journal of Engineering Research and Reports*. – 2025. – Vol. 198. – P. 109-120.
5. Kwiaton P. Computer-aided Rotary Crane Stability Assessment. – 2024. – 14 p.
6. Zhang Q., Li H., Wang Y. Stress Measurement and Analysis of Structural Parameters of Flat Arm Tower Crane Under Different Working Conditions // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15, No. 7. – P. 1137-1150.
7. Stability Analysis of Tower Crane During Rotational Motion Under Wind Load. – 2023. – 10 p.
8. Shima K. Research on Stability of Tower Crane Foundation Using Finite Element Method // *Jurnal Kejuruteraan*. – 2022. – Vol. 34, No. 2. – P. 22-31.
9. Dzerzhynskiy I. Exploring the Stability of Tower Cranes: A Comprehensive Analysis. – Kyiv, 2025. – 25 p.
10. Dutta S., Cai Y., Zheng J. Multi-objective Anti-swing Trajectory Planning of Double-pendulum Tower Crane Operations // *arXiv preprint*. – 2023. – 15 p.

Материал редакцияға 05.02.26 түсті, 20.03.26 қабылданды.

К.Г. Балабекова¹, А.Б. Тулеков¹, Р.Л. Сахапов²

¹*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

²*Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БАШЕННЫХ КРАНОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Аннотация. В данной работе разработана методика расчета, предназначенная для обеспечения устойчивости башенных кранов. Методика позволяет комплексно

учитывать основные действующие факторы в режиме работы крана - подъемную нагрузку, ветровую нагрузку, динамические силы, вес самого крана и условия опоры. По результатам численного моделирования были изучены смещения крана, эквивалентные напряжения, опорные реакции и формы потери устойчивости. Критическая нагрузка и предел устойчивости были точно определены с помощью диаграммы нагрузки–смещения, а зависимость коэффициента устойчивости от длины стрелы позволяет предварительно оценить опасные режимы работы. В ANSYS были проведены вычислительные работы по методике исследования.

Предлагаемая методика предназначена для применения на этапах проектирования, монтажа и эксплуатации башенных кранов и направлена на повышение уровня безопасности строительных работ.

Ключевые слова: башенные краны, устойчивость, момент опрокидывания, численное моделирование, нагрузка, ANSYS.

K.G. Balabekova¹, A.B. Tulekov¹, R.L.Sakhapov²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING TOWER CRANES TO ENSURE STABILITY

Annotation. In this paper, a calculation technique has been developed to ensure the stability of tower cranes. The technique allows us to comprehensively take into account the main operating factors in the crane operation mode - lifting load, wind load, dynamic forces, the weight of the crane itself and the support conditions. Based on the results of numerical modeling, crane displacements, equivalent stresses, support reactions, and forms of stability loss were studied. The critical load and stability limit were precisely determined using the load–displacement diagram, and the dependence of the stability coefficient on the boom length allows a preliminary assessment of dangerous operating modes. Computational work on the research methodology was carried out at ANSYS. The proposed methodology is intended for use at the stages of design, installation and operation of tower cranes and is aimed at improving the safety of construction work.

Keywords: tower cranes, stability, tipping moment, numerical simulation, load, ANSYS.