

УДК 620.179.1^624.012.45

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТНИХ ПЛИТ АПАРАТУ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ГАЗУ

*В пропонованій статті представлена модель процесу деформування фундаментних плит апарату повітряного охолодження газу на компресорних станціях магістральних газопроводів. Застосовано підхід, пов'язаний з узагальненням результатів розв'язання класичної задачі Бусінеска на випадок, коли на пружній півпростір діє декілька зосереджених сил, вектори яких ортогональні до поверхні. Враховується величина вказаних сил, фізико-механічні характеристики матеріалу плити, конструктивні особливості геометрії досліджуваного об'єкту*

*Ключові слова: апарат повітряного охолодження газу, деформація фундаменту, задача Бусінеска*

*В предлагаемой статье предложена модель процесса деформирования фундаментных плит аппарата воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Применен подход, связанный с обобщением результатов решения классической задачи Бусинеска на случай, когда на упругое полупространство действует несколько сосредоточенных сил, векторы которых ортогональны к поверхности. Учитывается величина указанных сил, физико-механические характеристики материала плиты, конструктивные особенности геометрии исследуемого объекта*

*Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения газа, деформация фундамента, задача Бусинеска*

**А.П. Олійник**

Доктор технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: (034) 224-32-19

E-mail: andrij-olijnyk@rambler.ru

**Б.С. Незамай**

Кандидат технічних наук\*

Контактний тел.: (034) 272-71-70

E-mail: boris\_may@ukr.net

**О.Р. Кучер**

Аспірант\*

Контактний тел.: (034) 272-71-70

E-mail: olga\_sun@ukr.net

\*Кафедра комп'ютерних технологій в системах управління і автоматики

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

## 1. Вступ

При експлуатації обладнання компресорних станцій магістральних трубопроводів виникають додаткові навантаження, які впливають на напружено-деформований стан як самих діючих елементів конструкції, так і фундаментів, на яких вказані конструкції розміщуються. Прикладом об'єкту такого роду є апарати повітряного охолодження газу (АПОГ) компресорних станцій, які функціонують в режимі вібраційних, статичних та динамічних впливів, пов'язаних з роботою лопатевого апарату. Аварії на об'єктах такого роду призводять до значних економічних втрат, а поступове руйнування фундаментних плит взагалі може унеможливити експлуатацію об'єкта.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Основними впливами на технічний стан апарату повітряного охолодження газу є вібраційні процеси. Дію інших факторів (вага апарату, зміна геометричних конфігурацій лопатей АПОГ, тощо) також треба враховувати при оцінці реального технічного стану

діючих об'єктів. Визначальними параметрами апарату АПОГ є його вага, механічні властивості бетонів фундаменту, швидкість обертання лопатевого апарату, геометрія лопатей, фізико-механічні властивості матеріалу, з якого виготовлено лопаті. В літературі описано ряд методів, які дозволяють оцінити реальний технічний стан АПОГ [1, 2, 3], проте вони розглядають параметри цього стану окремо для різних частин агрегату. Актуальною залишається задача розробки комплексної методики оцінки технічного стану об'єкту в цілому з урахуванням дії комплексу силових факторів та оцінки їх впливу на технічних стан об'єкта. Крім того, важливою проблемою є вивчення можливості використання математичного апарату для оцінки технічного стану апаратів вказаного типу.

## 3. Ціль і задачі дослідження

Метою дослідження є оцінка технічного стану фундаментів АПОГ. Для цього було поставлено задачу розробки математичної моделі процесу переміщень та напруженого стану фундаментних плит АПОГ.

#### 4. Моделювання деформування фундаментів АПОГ

Нехай на компресорній станції функціонує  $N$  – агрегатів, розташованих в ряди по  $k$ - штук в кожному, тобто, можна моделювати вказані об'єкти на деякій прямокутній стінці, замінюючи весь апарат діючою вертикальною силою  $P_{kl}$ , індекси в такому випадку означають координати точки прикладення зосередженої сили (рис. 1). В ідеальному випадку функціонування об'єкту  $P_{kl} = \text{const}$  для всіх точок прикладання, причому вказана константа є єдиною для всіх точок.

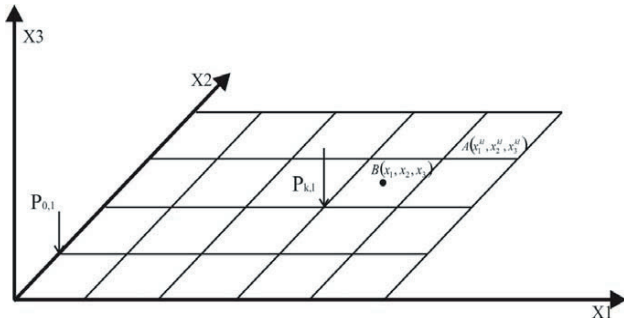


Рис. 1. Модель процесу деформування фундаментних плит АПОГ

В такому випадку модель процесу деформування та напруженого стану буде побудовано з урахуванням класичного розв'язку задачі Бусінеска [4] про дію зосередженої сили  $p$  на границі пружного півпростору, причому лінія дії сили ортогональна функція цього півпростору.

На основі розв'язку даної задачі встановлення, вектор переміщення точок півпростору визначається за формулами:

$$U_1(\vec{x}) = \frac{p(1+\nu)x_1}{2\pi E} \left[ \frac{x_3}{r^3} - \frac{1-2\nu}{r(r+x_3)} \right], \quad (1)$$

$$U_2(\vec{x}) = \frac{p(1-\nu)x_2}{2\pi E} \left[ \frac{x_3}{r^3} - \frac{1-2\nu}{r(r+x_3)} \right], \quad (2)$$

$$U_3(\vec{x}) = \frac{p(1+\nu)}{2\pi E} \left[ \frac{x_3^2}{r^3} + \frac{2(1-\nu)}{r} \right], \quad (3)$$

де:  $U_1, U_2, U_3$  – переміщення по координатах  $x_1, x_2$  та  $x_3$  відповідно в декартовій прямолінійній системі координат;  $p$  – величина діючого навантаження;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $r$  – відстань від точки дії сили до досліджуваної точки з координатами  $(x_1, x_2, x_3)$ . Додатнім по  $x_3$  вважається напрям вниз.

Якщо вважати, що сила діє в точці з координатами  $(0;0;0)$ , то

$$r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}, \quad (4)$$

а якщо координати точки прикладання сили має координати  $(x_1^0; x_2^0; x_3^0)$ , то:

$$r = \sqrt{(x_1^0 - x_1)^2 + (x_2^0 - x_2)^2 + (x_3^0 - x_3)^2}. \quad (5)$$

За заданими компонентами вектора переміщень можна побудувати тензорнапружень, який, з урахуванням співвідношень (1)-(3) може бути записаний у вигляді:

$$\sigma_{ij} = -\frac{3p}{2\pi} \left[ \frac{x_i x_j x_3}{r^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left( \frac{r^2 + g x_3 + x_3^2}{r^3 (r+x_3)} \delta_{ij} - \frac{x_i x_j (2r+x_3)}{r^3 (r+x_3)^2} \right) \right],$$

$$I, J = 1, 2, \quad (6)$$

$$\sigma_{i3} = -\frac{3p x_i x_3^2}{2\pi r^5}. \quad (7)$$

Всі величини в (6), (7) мають той же зміст, що і в (1) – (3),  $\sigma_{ij}$  – компоненти тензора напружень;  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ ;  $\delta_{ij} = 1$  при  $I=J$ .

Таким чином, узагальнюючи результати (1)–(7) на випадок конструкції, зображеної на рис. 1, можна одержати наступну модель напружено-деформованого стану АПОГ. Нехай в кожній точці  $A_{kl}$  на фундамент діє сила  $p_{kl}$ , а координати точки  $A_{kl}$  записуються у вигляді:

$$A_{kl}(x^{(kl)}_1; x^{(kl)}_2; x^{(kl)}_3). \quad (8)$$

В такому випадку в допущенні про те, що деформації мають пружний характер, для компонент-вектора переміщень та тензора напружень справедливими будуть наступні залежності:

$$U_1(\vec{x}) = \sum_k \sum_l \frac{p_{kl}(1+\nu)(x^{kl}_1 - x_1)}{2\pi E} \left[ \frac{-x^{kl}_3 + x_3}{r^{3}_{kl}} - \frac{1-2\nu}{r_{kl}(r_{kl} - x^{kl}_3 + x_3)} \right], \quad (9)$$

$$U_2(\vec{x}) = \sum_k \sum_l \frac{p_{kl}(1+\nu)(x^{kl}_2 - x_2)}{2\pi E} \left[ \frac{-x^{kl}_3 + x_3}{r^{3}_{kl}} - \frac{1-2\nu}{r_{kl}(r_{kl} + x^{kl}_3 - x_3)} \right], \quad (10)$$

$$U_3(\vec{x}) = \frac{p_{kl}(1+\nu)}{2\pi E} \left[ \frac{(x_3 - x^{kl}_3)^2}{r^{3}_{kl}} + \frac{2(1-\nu)}{r_{kl}} \right], \quad (11)$$

$$r_{kl} = \sqrt{(x^{kl}_1 - x_1)^2 + (x^{kl}_2 - x_2)^2 + (x^{kl}_3 - x_3)^2}, \quad (12)$$

де:

$(x_1, x_2, x_3)$  – координати довільної контрольної точки;  $(x^{kl}_1, x^{kl}_2, x^{kl}_3)$  – координати точки, в якій прикладаємо силу  $p_{kl}$ . Слід зазначити, що в (12) величини  $(x^{kl}_1 - x_1)$  не дорівнюють нулю, тому особливостей в (9) – (11) немає.

Компоненти тензора напружень обчислюються за формулами:

$$\sigma_{IJ} = - \sum_{k,l} \frac{3p_{kl}}{2\pi} \left[ \frac{(x_I - x_I^{kl})(x_J - x_J^{kl})(x_3 - x_3^{kl})}{\Gamma_{kl}^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left( \frac{\Gamma_{kl}^2 + \Gamma_{kl}(x_3 - x_3^{kl}) + (x_3 - x_3^{kl})^2}{\Gamma_{kl}^3(\Gamma_{kl} + x_3 - x_3^{kl})} \delta_{IJ} - \frac{(x_I - x_I^{kl})(x_J - x_J^{kl})(2\Gamma_{kl} + x_3 - x_3^{kl})}{\Gamma_{kl}^3(\Gamma_{kl} + x_3 - x_3^{kl})} \right) \right] \quad (13)$$

I, J = 1, 2, 3.

$$\sigma_{i3} = - \sum_{k,l} \frac{3p_{kl}}{2\pi} \frac{(x_i - x_i^{kl})(x_3 - x_3^{kl})^2}{\Gamma_{kl}^5}, \quad i=1,2,3. \quad (14)$$

В запропонованій моделі всі обчислення проводяться для модуля Юнга E та коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , взятих для бетону, з якого складається фундамент об'єкта. При проведенні практичних розрахунків необхідно враховувати характер зміни величини  $p_{kl}$  в кожній точці розрахункової сітки (для кожного вентилятора, змонтованого на промисловому майданчику, з урахуванням особливостей експлуатації даного об'єкту).

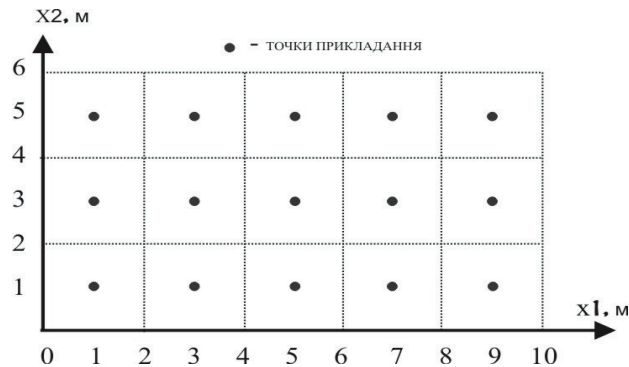


Рис. 2. Схема прикладення навантажень для модельної задачі визначення напружено-деформованого стану фундаментної плити апарату повітряного охолодження газу ( $x_1, x_2$  – похвдвжні та поперечні координати точок фундаментної плити)

Результати моделювання наведено на рис. 3. При заданих розмірностях вхідних величин розмірність одержаних деформацій – соті міліметра.

### 5. Висновки

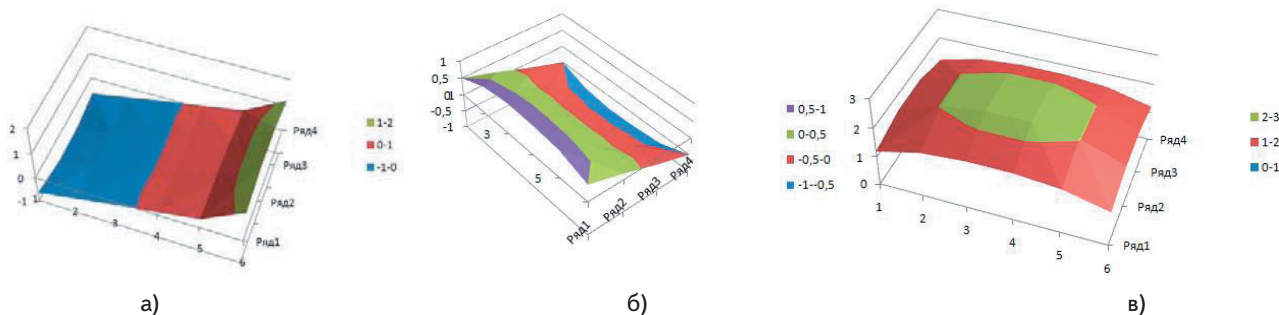


Рис. 3. Результати моделювання: а – деформація вздовж  $x_1$ ; б – деформація вздовж  $x_2$ ; в – деформація вздовж  $x_3$

Необхідні дані для розрахунків:  $p_{kl}$  (вага апарата, швидкість обертання, тяга, коефіцієнт підйимальної сили, геометрія і конфігурація лопатей). В такому випадку:  $p_{kl} = p_{kl}^v + p_{kl}^{aer}$ , де  $p_{kl}^v$  – вага вентилятора;  $p_{kl}^{aer}$  – аеродинамічна сила, яка притискає АПОГ до землі. На основі запропонованої математичної моделі деформування фундаментних плит АПОГ розроблено алгоритм та програмне забезпечення, що дозволяє оцінити деформацію фундаментної плити АПОГ при заданому навантаженні. Розрахункова сітка та схема навантажень чисельного експерименту наведена на рис. 2.

Розроблено математичну модель процесу деформування фундаментних плит апаратів повітряного охолодження газу на основі результатів розв'язку задачі Бусінеска, проведено їх узагальнення на випадок дії багатьох зосереджених сил. Проведені тестові розрахунки засвідчують добре узгодження моделі з реальною фізичною картиною процесу деформування.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з розрахунками для діючих апаратів повітряного охолодження газу.

### Література

1. Кронов, Н.П. Апараты воздушного охлаждения [Текст] / Н.П.Кронов. – М.: Химия, 1983. – 168с.
2. Ванчин, А.Г. Методы оценки технического состояния аппаратов воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Текст] / А.Г. Ванчин // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2012. – №4. – С.466–474. Режим доступу: <http://www.ogbus.ru/authors/vanchin/vanchin1.pdf>.
3. Заміховський, Л.М. Математичне моделювання процесу обтікання лопатей гвинта вентиляторного агрегату [Текст] / Л.М.Заміховський, Б.А. Кельбас, І.Т.Левицький // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2007. – №1/2(25). – С. 76–79.
4. Победря, Б.Е. Лекции по теории упругости [Текст] / Б.Е.Победря, Д.В.Георгиевский. – М.: Эдиториал, УРСС, – 1999 – 20-8с.

**Abstract**

The article represents the model of the deformation of the foundation system for gas air cooling of compressor station of the header. The modeling method is based on the solution of the classical problem of Boussinesq about the effect of concentrated force on the spring half-space, provided the orthogonality force vector to the specified half-space.

Implementing the model, the effect of forces on certain calculation grid with the possibility of setting the value of the current load at each point of the grid, changes in physical and mechanical properties of materials and design features of the geometry of the object under study were taken into account.

The way to determine three components of the displacement vector and six components of the stress tensor was suggested. A series of test calculations for the gas air cooling devices was suggested. There is a conclusion as for the good balancing of modeling results with the real picture of the deformation process, test points displacements and their spatial configuration.

The model can be used to study the gas air cooling devices as well as other equipment of compressor stations, which is characterized by concentrated forces, for example oil air cooling device, gas compressor units. The application of these methods and models allows a more accurate estimate of the stress-strain state of foundation plates of technological objects of compressor stations.

**Keywords:** gas air cooling device, deformation of foundation plates, Boussinesq problem

*Розглядаються недоліки сучасної теорії повітря-реактивних двигунів, які приводять до нестійкої роботи компресорів, хлопокам, вібраціям з наступним миттєвим флаттером літака при зльоті*

*Ключові слова: кінематичний аналіз, зона загальмованого потоку, гравітаційна сила, кути атаки*

*Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей (ВРД), приводящие к неустойчивой работе компрессора, хлопокам, вибрациям с последующим мгновенным флаттером самолета при взлете*

*Ключевые слова: кинематический анализ, зона заторможенного потока*

УДК 629.7.036.001

# ОСНОВЫ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКАХ

**Б. Ш. Мамедов**

Кандидат технических наук, доцент

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

E-mail: www.zntu.edu.ua

## 1. Введение, постановка проблемы

Современная теория воздушно-реактивных двигателей делится на две части: теоретическую и экспериментальную, которые существуют абсолютно автономно. Это объясняется тем, что теоретическая часть современной теории воздушно-реактивных двигателей основывается на ошибочных формулах тяги, полетного (тягового) КПД, выведенных академиком Б.С.Стечкиным в 1929г., и на такой же ошибочной теореме о подъемной силе продуваемого профиля, выведенной профессором Н.Е.Жуковским в 1912г., [1], [2].

Поэтому, любые узловые физические явления, имеющие место при работе ВРД, описываются в современной теории воздушно-реактивных двигателей ошибочно, например, теоретические и физические основы процесса

генерирования тяги ВРД, теоретические и физические основы работы ВРД при  $V_{II} \geq 0$ , теоретические и физические основы процесса генерирования отрывных течений по корытцам и спинкам лопаток рабочих колес (РК) ВРД и многие другие.

Ошибочность объяснения физических основ генерирования отрывных течений по корытцам и спинкам лопаток РК заключается в том, что современная теория воздушно-реактивных двигателей считает, что первичен срыв потока по корытцам лопаток последних рабочих колес компрессора высокого давления (КВД), поскольку ис увеличением  $V_{II}$  увеличивается  $T_b^*$  – температура газового потока на выходе из воздухозаборника, что приводит к увеличению  $C_k$  и снижению  $\Pi_k^*$  компрессоров, [3], такое ошибочное мнение базируется на ошибочной формуле коэффициента