

## УЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ФУНДАМЕНТ – НАДФУНДАМЕНТНОЕ СТРОЕНИЕ» ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ ПОД КОЛОННЫ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

О Чеботарева Е.Г., 2010

Приведен расчет центрально нагруженного фундамента по нормальным сечениям при равномерном, трапецидальном и параболическом распределении контактных давлений по подошве фундамента; выполнен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** «фундамент-основание», нормальное сечение, перераспределение усилий.

Calculation is resulted of the central loaded base on normal sections at uniform, trapeze and parabolic distribution of contact pressure on a base sole, the analysis of the received results is made.

**Keywords:** "base-basis", normal section, redistribution of efforts.

**Постановка проблемы.** Актуальным направлением в совершенствовании методов проектирования фундаментов под колонны каркасных зданий является развитие методов расчета, позволяющих учитывать резервы несущей способности системы «основание – фундамент». Высота плитной части таких фундаментов назначается по результатам расчета на продавливание с последующим применением унифицированных высот и вылетов ступеней. Совершенствование конструкции отдельно стоящих железобетонных фундаментов под колонны возможно осуществить путем перехода от двух-, трехступенчатых фундаментов к одноступенчатым, конструкция которых при расчете на изгиб и трещиностойкость без учета напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент» существенно увеличит расход арматуры по сравнению с многоступенчатыми фундаментами.

**Анализ исследований и публикаций.** В соответствии с [2] расчет центрально нагруженных фундаментов необходимо вести, исходя из условия, что нормальные контактные давления распределяются равномерно по подошве фундамента. Однако доказано, что в реальных условиях равномерность давления по подошве характерна только для жестких фундаментов, а для гибких необходимо учитывать перераспределение давлений [3; 4; 6; 7].

Согласно [5] во всех случаях разрушения фундамента эпюра нормальных контактных напряжений от приближающейся к прямоугольной на первых стадиях деформированного состояния трансформируется в трапецидальную, а на завершающих стадиях вплоть до разрушения – в криволинейно-выпуклую (параболическую).

Экспериментальным обоснованием теоретического анализа послужили результаты испытаний отдельно стоящих фундаментов под колонны различной гибкости на песчаном основании [3; 5] в результате которых были установлены формы и ординаты эпюр контактных давлений.

**Формулировка цели статьи.** Предложить методику расчета отдельно стоящих центрально нагруженных фундаментов под колонны каркасных зданий с учетом перераспределения усилий.

**Изложение основного материала.** Поэтому для повышения точности и надежности проектирования предлагается вести расчет фундаментов по нормальным сечениям с учетом перераспределения усилий.

Далее приводится расчет изгибающего момента в наиболее нагруженном сечении отдельно стоящего одноступенчатого фундамента под колонну каркасного здания при различных эпюрах распределения нормальных контактных напряжений по подошве фундамента.

### 1. Расчет при трапецидальном распределении контактных давлений по подошве фундамента

Изгибающий момент в сечении I-I:

$$M_{I-I}^H = Fx \quad (1.1)$$

Для удобства дальнейших преобразований введем обозначения:

$$\frac{l}{2} = t; \quad (1.2)$$

$$\frac{l_{on}}{2} = d$$

Изгибающий момент в сечении I-I:

$$M_{I-I}^H = \sum M_i = M_1 + M_2 + M_3 = F_1 x_1 + F_2 x_2 + F_3 x_3, \quad (1.3)$$

где  $F_1, F_2, F_3$  – равнодействующая эпюры контактных давлений, соответственно части 1, 2, 3 (рис. 1), расположенной справа от сечения I-I;  $x_1, x_2, x_3$  – расстояние от равнодействующей, соответственно  $F_1, F_2, F_3$ , до рассматриваемого сечения (рис. 3).

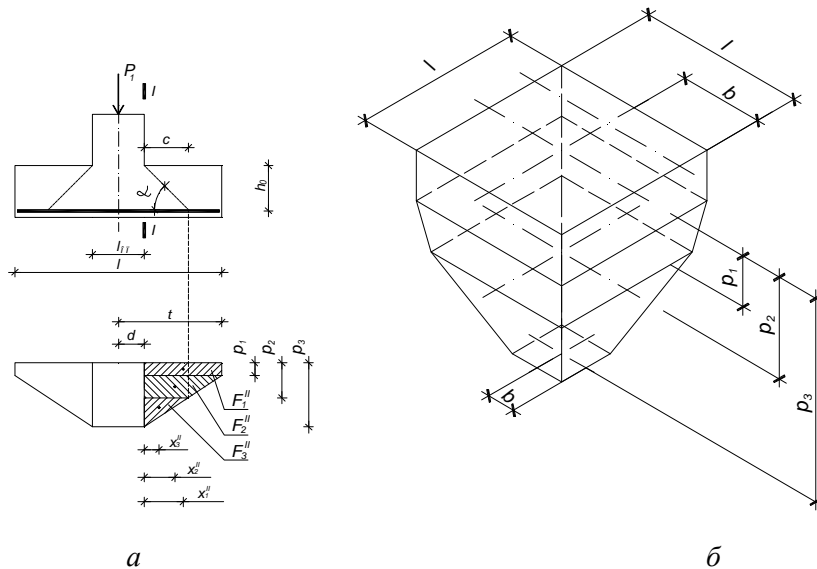


Рис. 1. К расчету при трапецидальном распределении контактных давлений по подошве фундамента: а – эскиз фундамента с эпюрой контактных давлений; б – эскиз пространственной модели эпюры контактных давлений

Запишем уравнения для определения  $M_1, M_2, M_3$  и полученные выражения подставим в (3):

$$M_1 = F_1 x_1 = (t - d) p_1 \frac{1}{2} (t - d) = \frac{1}{2} (t - d)^2 p_1; \quad (1.4)$$

$$M_2 = F_2 x_2, \quad (1.5)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} (p_2 - p_1) (t - d + c), \quad (1.6)$$

$$x_2 = \frac{c(p_2 - p_1) \frac{c}{2} + \frac{1}{2} (p_2 - p_1) (t - d - c) \left( \frac{1}{3} (t - d - c) + c \right)}{\frac{1}{2} (t - d + c) (p_2 - p_1)} = \frac{c^2 + (t - d - c) \left( \frac{1}{3} (t - d - c) + c \right)}{t - d + c}. \quad (1.7)$$

Подставляя (1.6), (1.7) в (1.5), получаем:

$$M_2 = \frac{1}{2}(p_2 - p_1) \left[ c^2 + (t - d - c) \left( \frac{1}{3}(t - d - c) + c \right) \right]; \quad (1.8.1)$$

$$M_3 = \frac{1}{2}c(p_3 - p_2) \frac{1}{3}c = \frac{p_3 - p_2}{6} c^2; \quad (1.8.2)$$

$$M_{I-I}^{II} = \frac{p_1}{2}(t - d)^2 + \frac{1}{2}(p_2 - p_1) \left[ c^2 + (t - d - c) \left( \frac{1}{3}(t - d - c) + c \right) \right] + \frac{p_3 - p_2}{6} c^2. \quad (1.9)$$

## 2. Расчет при параболическом распределении контактных давлений по подошве фундамента

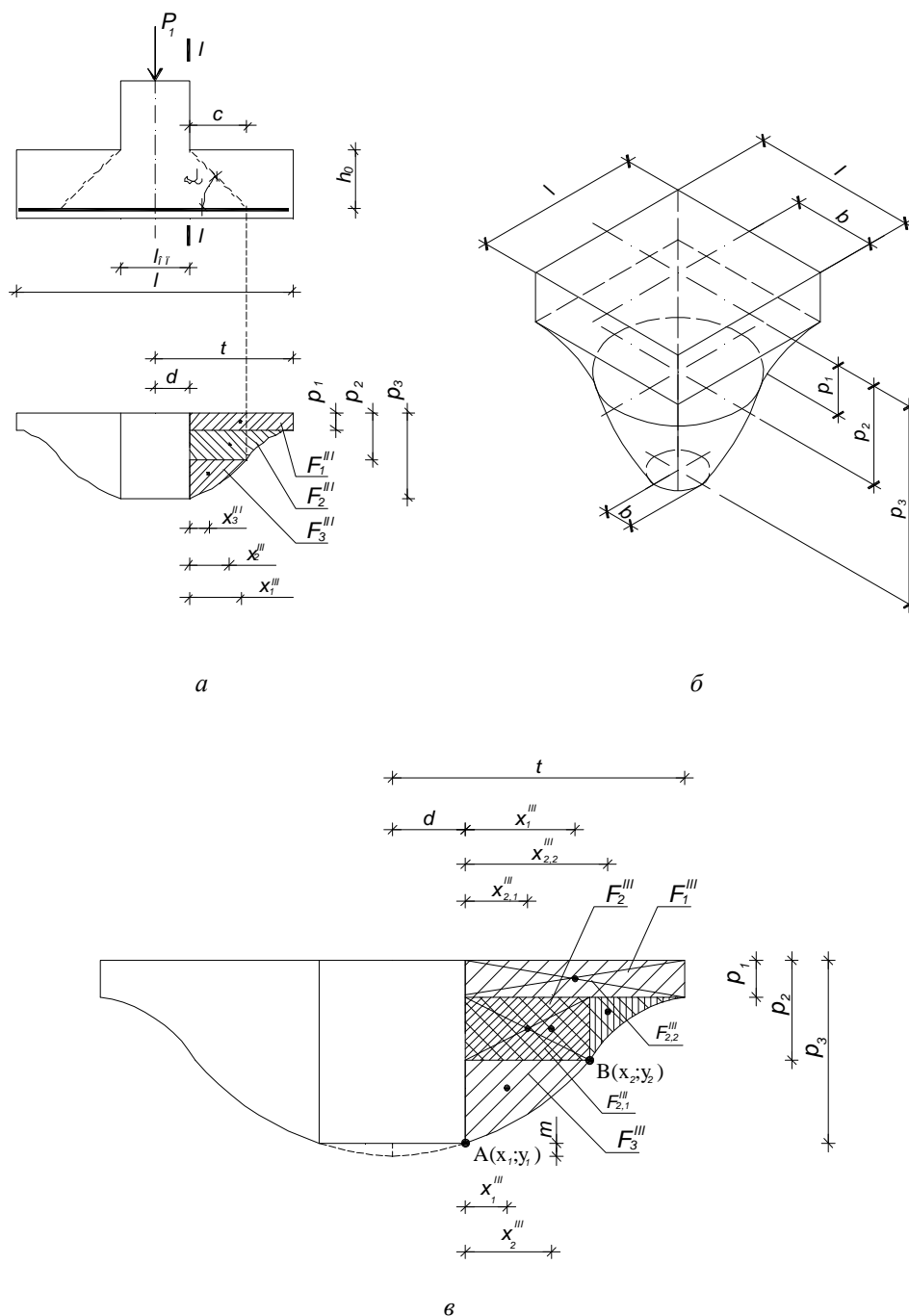


Рис. 2. К расчету при распределении контактных давлений по параболической эпюре: а – эскиз фундамента с эпюрой контактных давлений; б – эскиз пространственной модели эпюры контактных давлений; в – эпюра контактных давлений.

$$M^{III} = M_1^{III} + M_2^{III} + M_3^{III}; \quad (2.1)$$

$$M_1^{III} = F_1^{III} x_1^{III} = p_1(t-d) \frac{t-d}{2} = \frac{1}{2} p_1(t-d); \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} M_2^{III} &= F_2^{III} x_2^{III} = F_{2,1}^{III} x_{2,1}^{III} + F_{2,2}^{III} x_{2,2}^{III} = \\ &= \frac{1}{2} (p_2 - p_1) c^2 + \frac{(p_2 - p_1)(t-d-c)}{3} \left( \frac{(t-d-c)}{4} + c \right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Выведем уравнение параболы, соединяющей точки А(x<sub>1</sub>;y<sub>1</sub>), В(x<sub>2</sub>;y<sub>2</sub>) (рис. 2, в):

$$x_1 = d, \quad y_1 = m; \quad (2.4)$$

$$x_2 = d + c, \quad y_2 = p_3 - p_2;$$

$$y = f(x) = ax^2; \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} m = ad^2 \\ (p_3 - p_2) + m = a(d+c)^2; \end{cases} \quad (2.6)$$

$$a = \frac{p_3 - p_2}{(d+c)^2 - d^2}; \quad (2.7)$$

$$m = ad^2 = \frac{(p_3 - p_2)d^2}{(d+c)^2 - d^2}; \quad (2.8)$$

$$y = \frac{p_3 - p_2}{(d+c)^2 - d^2} x^2; \quad (2.9)$$

$$x^2 = \frac{y((d+c)^2 - d^2)}{p_3 - p_2}. \quad (2.10)$$

Площадь эпюры контактных давлений, расположенной справа от рассматриваемого сечения

$$F_3^{III} = F_{3,1}^{III} - F_{3,2}^{III}; \quad (2.11)$$

$$F_{3,1}^{III} = (p_3 - p_2)c; \quad (2.12)$$

$$F_{3,2}^{III} = \int_d^{d+c} \frac{p_3 - p_2}{(d+c)^2 - d^2} x^2 dx = \frac{p_3 - p_2}{(d+c)^2 - d^2} \frac{x^3}{3} \Big|_d^{d+c} = \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)}. \quad (2.13)$$

Подставляя (2.12), (2.13) в (2.11), получаем:

$$F_3^{III} = (p_3 - p_2)c - \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)}. \quad (2.14)$$

Определяем плечо равнодействующей эпюры контактных давлений, расположенной справа от рассматриваемого сечения:

$$\begin{aligned}
F_3^{III} x_3^{III} &= \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} x dy dx - F_3^{III} d = \int_d^{d+c} \int_{\frac{(p_3-p_2)x^2}{(d+c)^2-d^2}}^{(p_3-p_2)} x dy dx - F_3^{III} d = \\
&= \int_d^{d+c} \left( x(p_3 - p_2) - \frac{(p_3 - p_2)x^3}{(d+c)^2 - d^2} \right) dx - F_3^{III} d = \left( \frac{x^2}{2}(p_3 - p_2) - \frac{(p_3 - p_2)}{(d+c)^2 - d^2} \frac{x^4}{4} \right) \Big|_d^{d+c} - F_3^{III} d = (2.15) \\
&= (p_3 - p_2) \frac{(d+c)^2 - d^2}{2} - \frac{(p_3 - p_2)}{(d+c)^2 - d^2} \frac{(d+c)^4 - d^4}{4} - F_3^{III} d = \\
&= \frac{(p_3 - p_2) \left[ 2((d+c)^2 - d^2) - ((d+c)^2 + d^2) \right]}{4} - F_3^{III} d = \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^2 - 3d^2)}{4} - F_3^{III} d;
\end{aligned}$$

$$x_3^{III} = \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^2 - 3d^2)}{4 \left[ (p_3 - p_2)c - \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right]} - d = \frac{(d+c)^2 - 3d^2}{4 \left[ c - \frac{((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right]} - d \quad (2.16)$$

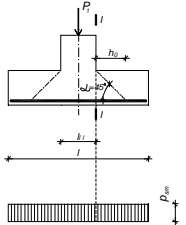
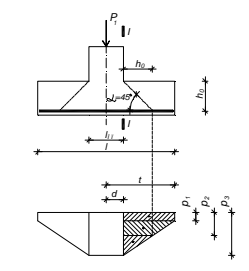
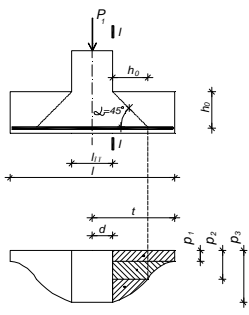
$$M_3^{III} = F_3^{III} x_3^{III} = \left[ (p_3 - p_2)c - \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right] \left[ \frac{(d+c)^2 - 3d^2}{4 \left[ c - \frac{((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right]} - d \right]; \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
M_{t-l}^{III} &= \frac{1}{2} p_1 (t-d)^2 + \frac{1}{2} (p_2 - p_1) c^2 + \frac{(p_2 - p_1)(t-d-c) \left( \frac{(t-d-c)}{4} + c \right)}{3} + \\
&+ \left[ (p_3 - p_2)c - \frac{(p_3 - p_2)((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right] \left[ \frac{(d+c)^2 - 3d^2}{4 \left[ c - \frac{((d+c)^3 - d^3)}{3((d+c)^2 - d^2)} \right]} - d \right]. \quad (2.18)
\end{aligned}$$

Для проверки рассматриваемых положений в полученные формулы были подставлены численные значения для центрально загруженных гибких фундаментов на песчаном основании. В первом случае рассматривался фундамент со стороной 1 м, во втором – 2 м, в третьем – 3 м. Анализ полученных результатов приведен с учетом того, что величина горизонтальной проекции наклонной трещины равна рабочей высоте подошвы фундамента [1] (табл. 1).

Проведенным теоретическим анализом определения изгибающих моментов в расчетных сечениях фундаментов и площади сечения рабочей продольной арматуры установлено, что расчет гибких фундаментов по нормальным сечениям с учетом перераспределения контактных давлений по подошве фундамента по трапециевидальной эпюре при условии, что длина горизонтальной проекции наклонной трещины равна полезной высоте фундамента, дает экономический эффект для первого варианта 0,3 %, для второго – 3,02 %, для третьего – 8,03 %; то же при параболической: для первого варианта – 2,06 %, второго – 8,22 %, третьего – 15,82 %.

Анализ результатов при  $c=h_0$ 

№ п/ п	Эскиз фундамента с эпюрой контактных давлений	Расчетная формула	Экономический эффект, %		
			I вариант (размеры фундамента 1*1 м)	II вариант (размеры фундамента 2*2 м)	III вариант (размеры фундамента 3*3 м)
1	2	3	4	5	6
1		$M_{I-I}^I = \frac{P_{sm}}{8} (l - l_{on})^2$	-	-	
2		$M_{I-I}^{II} = \frac{p_1}{2} (t-d)^2 + \frac{1}{2} (p_2 - p_1) \cdot \left[ h_0^2 + (t-d-h_0) \left( \frac{1}{3} (t-d-h_0) + h_0 \right) \right] + \frac{p_3 - p_2}{6}$	0,30	3,02	8,03
3		$M_{I-I}^{III} = \frac{1}{2} p_1 (t-d)^2 + \frac{1}{2} (p_2 - p_1) h_0^2 + \frac{(p_2 - p_1)(t-d-h_0) \left( \frac{t-d-h_0}{4} + h_0 \right)}{3} + \frac{2}{3} h_0 (p_3 - p_2) \left[ \frac{(d+h_0)^2 - 3d^2}{4 \left[ h_0 - \frac{((d+h_0)^3 - d^3)}{3((d+h_0)^2 - d^2)} \right]} - d \right]$	2,06	6,22	15,82

Наблюдается также тенденция к повышению экономического эффекта при увеличении размеров и показателя гибкости фундамента.

**Выводы.** Расчет по предлагаемой методике дает приближение рассчитываемой несущей способности нормальных сечений к фактической по сравнению с [1], что позволяет увеличить расчетные нагрузки на фундаменты или сократить материалоемкость, а также повысить надежность проектирования.

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. – Взамен СНиП II-21-75 и СН 511-78; Введ. 1.01.1986. – М.: ЦИТП, 1985. – 77 с. 2. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений. – Взамен СНиП II-15-74, СН 475-75; Введ. 1.01.1985. – М.: НИИОСП им. Герсеванова, 1985. – 48 с. 3. Родин С.В. Расчет фундаментов с учетом перераспределения усилий // Исследование и разработка методов расчета оснований и прочности фундаментов с применением нелинейных теорий деформирования: Межвузовский сборник. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1984. – С. 62–67. 4. Родин С.В., Бондаренко Л.А. Совершенствование расчетов и конструирования фундаментов. – К.: Знание, 1990. – 19 с. 5. Родин С.В., Жуков С.П. Перераспределение нормальных

контактных напряжений под фундаментами натуральных размеров: Межвузовский сборник. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1986. – С. 43–46. 6. Родин С.В., Чеботарева Е.Г. Проектирование двухслойных фундаментов под колонны каркасных зданий: Сборник научных трудов «Строительство и техногенная безопасность». – Симферополь, 2008. – С. 52–57. 7. Залесов А.С., Тетиор А.Н., Лехно А.М. и др. Прочность плитных фундаментов по наклонным сечениям // Бетон и железобетон. – 1987. – №10. – С. 45–46.

УДК 532.542:532.559.3

**В.В. Чернюк**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра гідравліки та сантехніки

## **УРАХУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТИСКУ У ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОМУ РІВНЯННІ РУХУ РІДИНИ ЗМІННОЇ МАСИ ДЛЯ НАПІРНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

© Чернюк В.В., 2010

**У диференціальне рівняння руху рідини змінної маси для напірних розподільних трубопроводів (РТ) введено компоненту гідродинамічного тиску зовнішнього потоку рідини. Цим підвищується точність розрахунку РТ.**

**Ключові слова:** напірні розподільні трубопроводи; рух рідини змінної маси.

**A component which takes into account the hydrodynamic pressure of the internal fluid flow is introduced into the differential equation of variable mass fluid flow for distributive pipelines (DP). Such correction improves the accuracy of calculation of DP.**

**Keywords:** pressure distributive pipelines, variable mass fluid flow.

**Вступ.** Напірні потоки з дискретною шляховою роздачею рідини поширені у більшості виробництв (іригації, вентиляції, водопостачанні, водовідведенні, водному транспорті, хімічній, металургійній і харчовій промисловостях тощо) Розроблені різні методики розрахунку напірних розподільних трубопроводів (РТ). Точний їх гідравлічний розрахунок можна зробити тільки за допомогою теорії гідравліки змінної маси [1, с. 4].

Творцем теорії руху тіл змінної маси є проф. І. В. Мещерський. Він поставив задачу, вивів основні рівняння та вказав галузі їх застосування. Роботи проф. І. В. Мещерського “Динаміка точки змінної маси” (1897 р.) і “Рівняння руху точки змінної маси в загальному випадку” (1904 р.) створили новий розділ теоретичної механіки. Спираючись на цей розділ, стали успішно розвиватися ракетодинаміка та гідравліка рідини змінної маси. На основі рівнянь, отриманих проф. І. В. Мещерським для точки змінної маси, проф. І. В. Маккавеев у 1928 р. вперше вивів загальне диференціальне рівняння руху рідини змінної маси (ДРРРЗМ) і застосував його до розв’язування задачі про гідравлічний стрибок. У 1937 р. проф. Я. Т. Ненько одержав ДРРРЗМ для цілого потоку і застосував його до задач з розрахунку дірчастих РТ з безперервною шляховою роздачею рідини. Він же установив критерії класифікації трубопроводів за довжиною. У тому ж році проф. І. М. Коновалов отримав ДРРРЗМ, враховуючи закон кількості руху, і застосував його під час розв’язування задач про рух рідини в трубопроводах і каналах. У 1940 р. проф. А. Н. Патрашев на основі урахування зміни питомої енергії під час руху рідини у каналах отримав ДРРРЗМ [2, с. 3–4].

**Аналіз ДРРРЗМ.** Загальне ДРРРЗМ, що описує одночасне збирання та роздачу маси, проф. Г. А. Петров записує так [2, с. 17]: