

тять систему енергоснабження підприємств від перекомпенсації. Для цього в алгоритмі задачі оптимізації повинно бути враховано, що область  $\sigma_k > 0$  або  $\sigma_k \rightarrow \sigma_{kopt}$ , де область  $\sigma_{kopt}$  - заздалегідь розрахована оптимальна область, що задовольняє всім умовам рішення задачі оптимальної компенсації реактивної складової потужності.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. - М.: Энергия, 1975. - 182 с.
2. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. - М.: Энергоиздат, 1981. - 200 с.

3. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. - Москва: ЭНАС, 2009. - 456 с.
4. Горнштейн В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем - М.: Энергия. - 1981. - 336 с.
5. Рвачев В.Л. Геометрические приложения алгебры логики - Киев: Техника, 1967. - 212 с
6. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. - К.: Наукова думка, 1982- 552 с.
7. Рвачев В.Л., Манько Г.П. Автоматизация программирования в крайних задачах. - К.: Наукова думка, 1983- 234 с.

УДК 614.84

**Росоха С.В., Сенчихин Ю.Н., Остапов К.М., Дендаренко Ю.Ю.**  
*Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков*

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЖАРНОГО СТВОЛА-РАСПЫЛИТЕЛЯ

**Введение.** На современном этапе развития систем пожаротушения пожарные спасатели используют достаточно широкий спектр технических средств и тактических приемов их применения. В этой связи повышение эффективности воздействия на пожар различных огнетушащих составов (ОС) и приемов тушения пожаров до настоящего времени является актуальным направлением совершенствования мер противопожарной защиты. Одним из путей решения задач этой проблемы является изменение физико-химических свойств ОС. Другим - совершенствование приемов подачи ОС, в том числе таких универсальных средств, как вода.

**Цель и задача.** При выполнении государственной темы [1] совместно с отделом прикладной математики и вычислительных методов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины рассматривалась задача для общего случая подачи огнетушащего вещества (ОВ) через проточную часть ствола-распылителя ранцевой установки «Тайфун» как течение

несжимаемой жидкости. Необходимо отметить, что сформулированная этой темой проблема в определенной мере отвечает задачам конструирования насадка на стволы-распылители ранцевой установки АУТГОС, предназначенной для тушения пожаров с применением гелеобразующих составов [2,3,4], так как ее конструкцией также предусмотрена импульсная подача огнетушащих составов на очаг пожара. Разработанный нами согласно заявке на патент Украины от 07.09.2015 г. в конструктивном исполнении (рис.1) насадок сложной конфигурации вполне соответствует рассматриваемой схеме (рис. 2).

**Результаты исследования.** Очевидная похожесть схемных решений (рис. 1 и рис. 2) позволяет математическую модель исследований представить в классическом виде:

$$\begin{aligned} V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \gamma \Delta V_x &= 0, \\ V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \gamma \Delta V_y &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

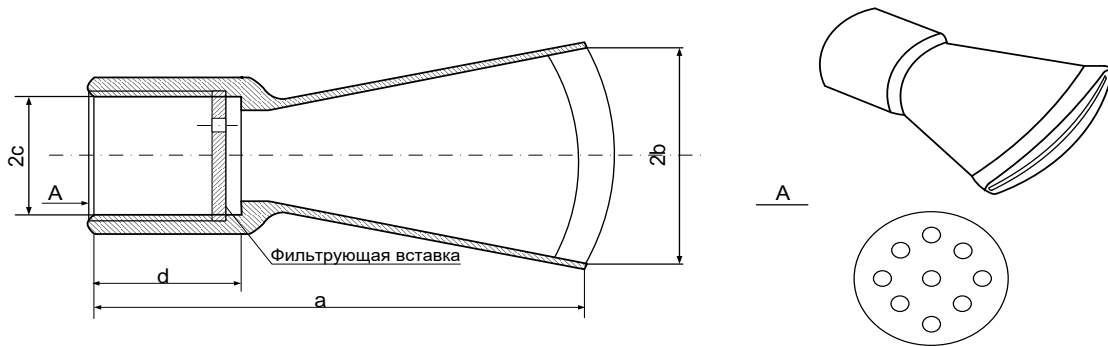


Рис. 1. Насадок на пожарный ствол для распыления ОВ плоскими струями

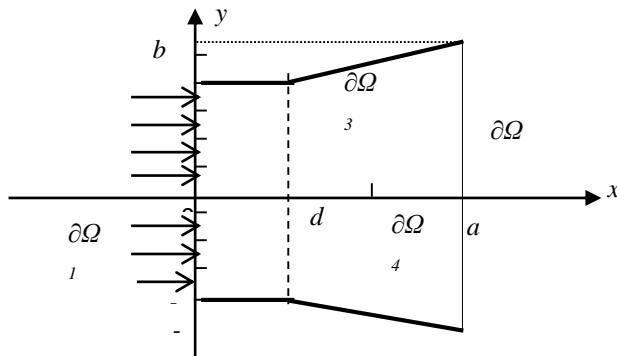


Рис. 2. Схема проточной части канала насадка пожарного ствола-распылителя

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где (1) – уравнения Навье-Стокса [1], (2) – уравнение неразрывности движения потока жидкости,  $\rho$  – плотность жидкого огнетушащего вещества (ОВ),  $\gamma$  – кинематический коэффициент ее вязкости.

Граничные условия формулируются как условие прилипания частиц жидкости к твердой стенке (отсутствие скорости скольжения жидкости по поверхности).

На входе ствола-распылителя известно  $V_x = V_1(y)$ ,  $V_y = 0$ . На выходе

имеем  $\int_{-c}^c V_1(y)dy = \int_{-b}^b V_2(y)dy$ , что следует из равенства расхода жидкости, проходящей через входное и выходное сечение канала. Поскольку, в нашем случае, канал обладает симметрией относительно оси  $x$ , можно ограничиться рассмотрением полуплоскости  $y > 0$ . Потому, на линии симметрии, которая совпадает с осью  $x$ , граничное условие для функции тока  $\Psi = 0$ , а на выходе  $\int_0^c V_1(y)dy = \int_0^b V_2(y)dy$ .

После дифференцирования первого из уравнений (1) по  $y$ , а второго по  $x$  вычитаем из первого второе:

$$\begin{cases} V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \gamma \Delta V_x = 0; & \left| \frac{\partial}{\partial y} \right. \\ V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \gamma \Delta V_y = 0; & \left. \frac{\partial}{\partial x} \right. \end{cases} \quad (3)$$

Вычитанием второго уравнения из первого исключаем в уравнениях (1) давление  $P$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_x}{\partial y} \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_x \frac{\partial^2 V_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_y \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} - \\ & - \gamma \frac{\partial}{\partial y} \Delta V_x - \frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\partial V_y}{\partial x} - V_x \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \\ & - V_y \frac{\partial^2 V_y}{\partial x \partial y} + \gamma \frac{\partial}{\partial x} \Delta V_y = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

После чего, вводя функцию тока  $V_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y}$ ;  $V_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$ , тождественно удовлетворяем (2).

Окончательно в безразмерной системе координат получим нелинейное уравнение в частных производных четвертого порядка

$$\frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

где  $\text{Re} = V / \gamma$  - число Рейнольдса.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \Psi|_{\alpha\Omega_1} &= \Psi_1 = \int_0^y V_1(y)dy; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial n}|_{\alpha\Omega_1} = 0; \\ \Psi|_{\alpha\Omega_3} &= \Psi_3 = \int_0^c V_1(y)dy; \quad \Psi|_{\alpha\Omega_4} = \Psi_4 = 0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_{3,4}} = 0; \Psi \Big|_{\partial \Omega_2} = \Psi_2 = \int_0^y V_2(y) dy; \quad (6)$$

$$\int_0^c V_1(y) dy = \int_0^b V_2(y) dy; \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_2} = 0;$$

Для решения поставленной задачи применялся метод R-функций (RFM).

Так называемая структура задачи (5) – (6) имеет вид:

$$\Psi = \omega^2 P + \frac{\sum_{i=1}^4 \Psi_i}{\sum_{i=1}^4 W_i^2} = \Psi_1 + \Psi_0, \quad (7)$$

где уравнение для контура  $\Omega$  (построено при помощи R-функций).

$$\Omega : (W \equiv W_1 \wedge_\alpha W_2 \wedge_\alpha W_3 \wedge_\alpha W_4); \quad (8)$$

$$\partial \Omega_1 : (W_1 \equiv y \geq 0),$$

$$\partial \Omega_2 : \left( W_2 \equiv (c - y) V_\alpha \left( \frac{b - c}{a - d} (x - d) + c - y \right) \geq 0 \right)$$

$$\partial \Omega_3 : (W_3 \equiv x \geq 0), \partial \Omega_4 : (W_4 \equiv a - x \geq 0) \quad (9)$$

$$\begin{cases} x \Lambda_\alpha y = \frac{1}{1 + \alpha} (x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy}) \\ x V_\alpha y = \frac{1}{1 + \alpha} (x + y + \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy}) \end{cases}$$

система  $\{R_\alpha\}$ . (10)

Линеаризация уравнения  $\alpha(\Psi) + N(\Psi)M(\Psi) = 0$  по методу Ньютона-Канторовича (линеаризация через разложение по формулам Тейлора)

$$\delta U_n = U_{n+1} - U_n \text{ приводит к}$$

$$\alpha(\Psi_{n+1}) + N(\Psi_n)M(\Psi_{n+1}) + N(\Psi_{n+1})M(\Psi_n) - N(\Psi_n)M(\Psi_n) = 0, \text{ или}$$

$$\alpha(\Psi_{1_{n+1}}) + N(\Psi_{1_n})M(\Psi_{1_{n+1}}) + N(\Psi_{1_{n+1}})M(\Psi_{1_n}) + N(\Psi_0)M(\Psi_{1_{n+1}}) + N(\Psi_{1_{n+1}})M(\Psi_0) - \alpha(\Psi_0) - N(\Psi_0)M(\Psi_0) + N(\Psi_{1_n})M(\Psi_{1_n}) = 0. \quad (11)$$

В окончательном варианте (после подстановки в (5)  $\Psi = \Psi_1 + \Psi_0$  и вышеуказанной линеаризации) по методу наименьших квадратов с организацией итерационного процесса решается уравнение:

$$\frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_{1_{n+1}} - \left\{ \frac{\partial \Psi_{1_n}}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_{n+1}}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{1_{n+1}}}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_n}}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_{1_n}}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_{n+1}}}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{1_{n+1}}}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_n}}{\partial y} \right\} - \frac{\partial \Psi_{1_{n+1}}}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_{n+1}}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{1_{n+1}}}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_{n+1}}}{\partial y} = -\frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \Psi_0 + \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_0}{\partial y} - \frac{\partial \Psi_{1_n}}{\partial y} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_n}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{1_n}}{\partial x} \frac{\partial \Delta \Psi_{1_n}}{\partial y}. \quad (12)$$

В качестве первого приближения ( $n = 0$ ) можно выбирать либо  $\Psi_{1_0} = 0$ , либо  $\Psi_{1_0} = W^2$ .

Численная реализация приведенных алгоритмов проводилась в отделе прикладной математики и вычислительных методов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины с использованием автоматизированной системы ПОЛЕ для вариантов:

1. В качестве  $V_1(y)$  и  $V_2(y)$  будем рассматривать параболические профили скорости.

$$V_1(y) = \frac{c^2 - y^2}{c^2} \cdot V_{\max}; \quad (13)$$

$$V_2(y) = \frac{(b^2 - y^2)c}{b^3} \cdot V_{\max}; \quad (14)$$

где  $V_{\max}$  - известный параметр.

Граничные условия запишутся следующим образом:

$$\Psi \Big|_{\partial \Omega_1} = \Psi_1 = \int_0^y V_1(y) dy = \int_0^y \left( 1 - \frac{y^2}{c^2} \right) V_{\max} dy = V_{\max} \left( y - \frac{y^3}{3c^2} \right);$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_1} = 0;$$

$$\Psi \Big|_{\partial \Omega_3} = \Psi_3 = \int_0^c V_1(y) dy = \frac{2}{3} c V_{\max};$$

$$\Psi \Big|_{\partial \Omega_4} = \Psi_4 = 0; \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_{3,4}} = 0; \quad (15)$$

$$\int_0^c V_1(y) dy = \int_0^b V_2(y) dy; \frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_{\partial \Omega_2} = 0;$$

Картины функции тока и распределения поля скоростей приведены на рис.3 (при  $Re = 1000$ ).

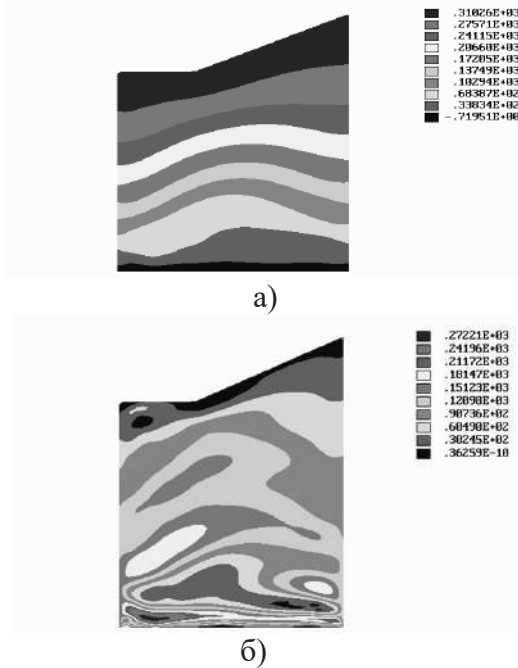


Рис. 3. Картины линий тока (а) и поле скоростей (б)

2.  $V_1(y) = V_0 = const$  (удар), а

$$V_2(y) = \frac{(b^2 - y^2)c}{b^3} \cdot \frac{3}{2} cV_0;$$

где  $V_0$  - известный параметр.

Граничные условия запишутся:

$$\Psi|_{\partial\Omega_1} = \Psi_1 = \int_0^y V_0 dy = V_0 y; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_1} = 0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_3} = \Psi_3 = \int_0^c V_1(y) dy = cV_0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_4} = \Psi_4 = 0; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_{3,4}} = 0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_2} = \Psi_2 = \int_0^y V_2(y) dy = \frac{3cV_0}{2b^3} \left( b^2 y - \frac{y^3}{3} \right); \quad (16)$$

$$\int_0^c V_1(y) dy = \int_0^b V_2(y) dy; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_2} = 0;$$

Картины функции тока и распределения поля скоростей приведены на рис.4 (при  $Re = 1000$ ).

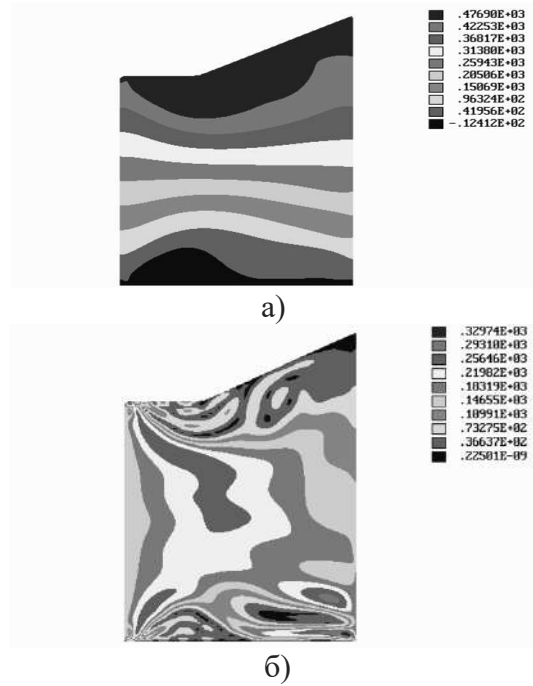


Рис. 4. Картины линий тока (а) и поле скоростей (б)

3.  $V_1(y) = V_0 = const$  (удар), а

$$V_2(y) = V_1 = \frac{V_0 c}{b} = const \text{ (выброс)}$$

где  $V_0$  - известный параметр.

Граничные условия:

$$\Psi|_{\partial\Omega_1} = \Psi_1 = \int_0^y V_0 dy = V_0 y; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_1} = 0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_3} = \Psi_3 = \int_0^c V_1(y) dy = cV_0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_4} = \Psi_4 = 0; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_{3,4}} = 0;$$

$$\Psi|_{\partial\Omega_2} = \Psi_2 = \int_0^y V_2(y) dy = \frac{cV_0}{b} y; \quad (17)$$

$$\int_0^c V_1(y) dy = \int_0^b V_2(y) dy; \quad \frac{\partial\Psi}{\partial n}|_{\partial\Omega_2} = 0;$$

Картины функции тока и распределения поля скоростей приведены на рис.5 (при  $Re = 1000$ ).

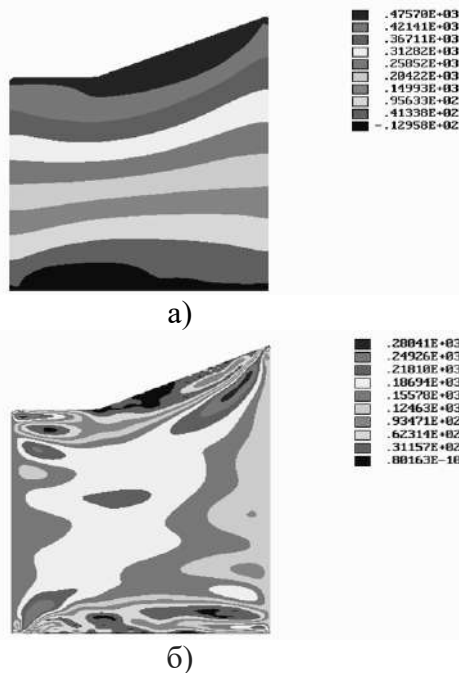


Рис. 5. Картины линий тока (а) и поле скоростей (б).

**Выводы.** В данной статье приводятся результаты расчетов только для  $Re=1000$ , которые показали качественную картину поведения жидкости в насадке ствола-распылителя. При этом установлено, что в связи с небольшой длиной проточной части насадкалинии тока на выходе ствола-распылителя имеют одинаковый характер, т.е. условия ограничения для движения потока жидкости отсутствуют. Кроме того, исследована задача возникновения условного удара на входе с естественными граничными условиями на выходе изнасадка. Особенно интересовало поведение жидкости в верхней правой части. Картина функций тока и поля скоростей для куса области размером  $0,1 \times 0,1$  вблизи этой части приведена на рис. 6 (при  $Re = 1000$ ).

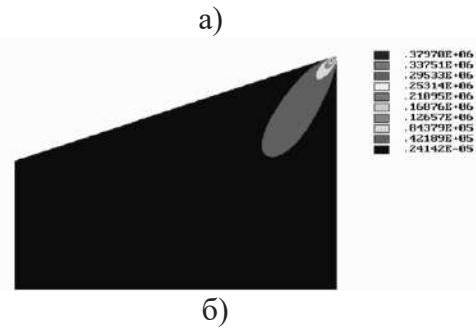


Рис. 6. Картина линий тока (а) и поля скоростей (б) для куса области размером  $0,1 \times 0,1$  вблизи верхней правой части

Анализ картин полученных результатов указывает на отсутствие обратных течений вовнутрь проточной части насадка, что дает основание полагать о рациональности конструктивного исполнения пожарного ствола-распылителя по заявке на патент Украины №U 2015 08629 от 07.09.2015 года.[3].

Материалы проведенных экспериментов с опытным образцом насадка ствола-распылителя подтверждают сказанное (рис. 7).



Рис. 7. Фото экспериментов с опытным образцом насадка ствола-распылителя

ЛИТЕРАТУРА:

1. Определение тактических возможностей импульсных огнетушителей "Тайфун", № госрегистрации 0199u003375, АПБУ, Харьков, 2000 г.
2. Анализ процесса подачи и траектории потока струй огнетушащего вещества установкой АУТГОС / С.В. Росоха, Ю.Н. Сенчихин, А.А. Киреев, К.М. Остапов // Проблемы пожарной безопасности – Харків: НУЦЗУ, 2015. – Вип. 38. – С. 56-65.
3. Киреев А.А. Об особенностях тушения пожаров гелеобразующими огнетушащими составами / А.А. Киреев К.М., Остапов, Ю. Н. Сенчихин // Проблемы гражданского захисту: управління, попередження,

- аварійно-рятувальні та спеціальні роботи: міжнар. наук-прак. конф., 01-02 жовтня, 2015 р. : тези доп. — Х., 2015. — С. 73-75.
4. Остапов К.М. Исследование тактико-технических аспектов применения автономной установки тушения гелеобразующими составами / К.М. Остапов, Ю. Н. Сенчихин // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах: всеукр. наук-прак. конф., 28-29 жовтня, 2015 р. : тези доп. — Х., 2015. — С. 169-171.
  5. Насадок для створення плоско-радіальної водяної завіси / С.В. Росоха, Ю.М. Сенчихін, В.А. Голендер, К.М. Остапов, Ю.Ю. Дендаренко. - заявка на патент України № U 2015 08629 от 07.09.2015 р.
  6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. - 840 с.
  7. Rvachev V.L., Sheiko T.I. R-functions in boundary value problems in mechanics.-ApplMech Rev, vol 48, no 4, April 1995, p.151-188.

УДК 621.432.4

**Шатохин В.М., Гранько Б.Ф.**

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТАХ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**Постановка проблемы.** Вибрационные технологии чрезвычайно широко используются в строительной индустрии и производстве строительных материалов: транспортно-технологические машины, устройства для разделения сыпучих смесей, вибрационные машины и уплотняющие устройства, мельницы и дробилки, вибрационные аппараты для интенсификации физических процессов и химических реакций при производстве строительных материалов и т.д. Их применение позволяет интенсифицировать производственные процессы, повышать качество работ, создавать материалы с новыми свойствами, снижать материалоемкость и энергоемкость оборудования [1 - 3]

Получили достаточно широкое распространение вибрационные аппараты с эксцентриковым ротором, дебалансами и асинхронным электроприводом [4]. Их конструкции являются относительно несложными, однако достоверное описание параметров их движений представляет значительные трудности: станины устройств совершают колебательные движения, параметры которых могут быть определены только путем динамического анализа; в ка-

честве приводного двигателя используется асинхронный электродвигатель, как наиболее простой, дешевый и удобный в эксплуатации, что порождает дополнительные трудности, связанные с описанием его динамической характеристики при переходных режимах и нагрузке, имеющей колебательный характер. В настоящее время математические модели указанных вибрационных аппаратов разработаны недостаточно, что затрудняет рациональный выбор их параметров и прогнозирование технологических качеств устройств. Исследования по решению этих задач имеют актуальный характер.

**Анализ основных исследований и публикаций.** В работе [4] получены уравнения движения простейшей модели механизма на установившихся режимах работы и в предположении, что рабочий орган совершает поступательное движение. Однако в большинстве случаев условия поступательного движения не выполняются