
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РЕЗЕРВУАРА

**А.А. Таранцев, доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы Российской Федерации;**

П.Н. Марухин;

О.В. Петрова, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассматривается математическая модель комбинированной гидравлической системы противопожарной защиты резервуара со стационарной крышей. Такая гидросистема для резервуаров в группе, будучи запитанной от общего коллектора, позволяет осуществлять как секционное орошение стенок резервуара в зависимости от сценария пожара, так и подавать воду в огнепреградители с целью повышения их огнестойкости и недопущения попадания пламени в дыхательную арматуру или объём резервуара. Для решения задач анализа и синтеза такой комбинированной гидросистемы приведена соответствующая математическая модель, основанная на уравнениях гидравлического баланса.

Ключевые слова: резервуар со стационарной крышей, пожар, орошение, дыхательная арматура, огнепреградитель

MATHEMATICAL MODEL OF COMBINED HYDRAULIC PROTECTION SYSTEM OF THE PETROLEUM TANK

A.A. Tarantsev; P.N. Maruhin; O.V. Petrova.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article discusses the mathematical model of a combined hydraulic system fire protection tank with a stationary roof. Such a hydraulic system for tanks in the group being powered from a common manifold, allows as sectional water tank walls depending on the scenario of a fire and to supply water to the flame-arrester device with the aim of improving their fire resistance and to prevent penetration of flame in the breathing valves or in the volume of the tank. For solving problems of analysis and synthesis of such combined hydraulic system provides relevant mathematical model based on equations of hydraulic balance.

Keywords: stationary roof reservoir, fire, irrigation, breathing valves, fire arrester device

Для хранения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ) широкое применение нашли резервуары со стационарной крышей типа «резервуар вертикальный стальной» [1]. Поскольку при их эксплуатации имеют место малое и большое «дыхания», группы таких резервуаров связаны общей дыхательной арматурой с отводом взрыво- и пожароопасных паров ЛВЖ и ГЖ в безопасную зону [2].

Тем не менее резервуары подвержены риску возгорания (рис. 1). Например, как показывает статистика [3, 4], пожар в дыхательной арматуре возникает с частотой $9 \cdot 10^{-5}$ случаев в год.



Рис. 1. Пожар в резервуарном парке

Комбинированная гидросистема противопожарной защиты резервуара

Для предотвращения распространения пламени по дыхательной арматуре резервуары снабжены сухими огнепреградителями [5], которые с целью повышения огнестойкости могут иметь системы охлаждения [6]. Учитывая, что сами резервуары имеют систему орошения (охлаждения) стенок, представляется целесообразным совместить её с устройством защиты огнепреградителя путём подачи воды на его охлаждение (рис. 2, 3), выполнив тем самым такую гидросистему комбинированной.

Комбинированная система орошения стенок резервуара может быть выполнена четырехсекционной, регулируемой набором задвижек (рис. 3) в зависимости от сценария пожара (горит ли сам резервуар или соседние в группе) и направления ветра. При орошении горящего резервуара задействуется задвижка на обводной линии, обеспечивающая повышенную интенсивность подачи воды на охлаждение [7].

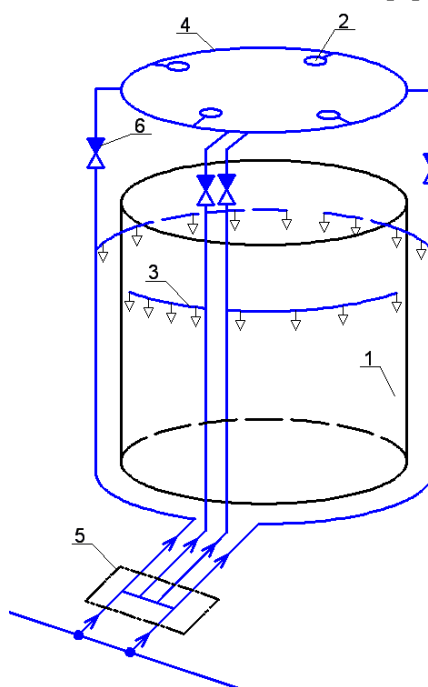


Рис. 2. Комбинированная гидравлическая система охлаждения резервуара и дыхательной арматуры (1 – резервуар; 2 – дыхательная арматура с огнепреградителем; 3 – секция системы орошения стенок резервуара; 4 – кольцевой трубопровод системы орошения дыхательной арматуры; 5 – блок задвижек комбинированной гидросистемы; 6 – обратный клапан)

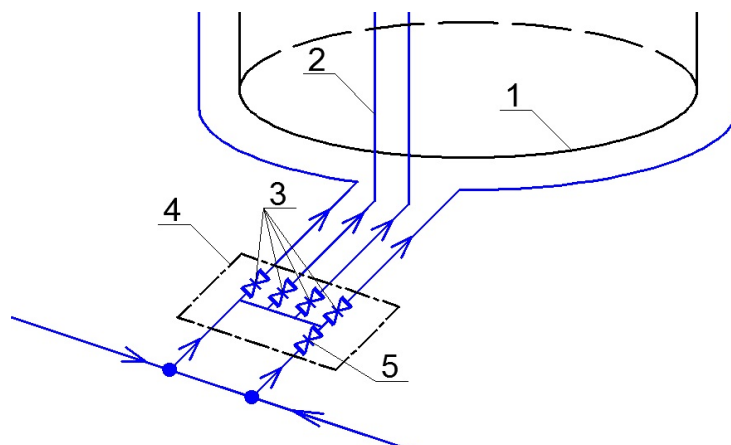


Рис. 3. Блок задвижек комбинированной гидросистемы
 (1 – резервуар; 2 – трубопровод секции системы орошения стенок резервуара;
 3 – задвижка включения секции орошения стенок; 4 – блок задвижек комбинированной
 гидросистемы; 5 – задвижка обводной линии)

Применительно к рассматриваемой гидросистеме противопожарной защиты (ППЗ) резервуара предполагается решать два класса задач – её анализ и синтез. В первом случае, исходя из размеров гидросистемы и её элементов, напорно-расходной характеристики (НРХ) насосов и вариантов включения (задействованы одна, две, три или все четыре секции орошения стенок совместно с подачей воды в огнепреградители) требуется определить расходы $\{Q\}$ из оросителей и вводов в огнепреградители. Во втором случае, исходя из требований к предельным величинам $\{Q\}$, требуется подобрать такие параметры насосов и/или диаметры трубопроводов и оросителей.

Математическая модель комбинированной гидросистемы

Решение задач анализа и синтеза комбинированной гидравлической системы ППЗ резервуара предполагает построение её математической модели (ММ) при различных вариантах включения гидросистемы (рис. 3). При этом могут быть использованы общепринятые в гидравлике допущения [8]: жидкость (вода) несжимаемая, потери давления Δp в трубопроводе подчиняются закону Дарси-Вейсбаха (то есть пропорциональны квадрату объёмного расхода Q) и зависят от перепада высот Δh :

$$\Delta p = A Q^2 + \rho g \Delta h,$$

где A – коэффициент сопротивления, кг/м^7 ; ρ – плотность жидкости (для воды $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$); $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Величина коэффициента сопротивления A трубопровода, состоящего из n участков, в свою очередь, может быть найдена из выражения [9]:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = 0,5 \rho \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{li} + \xi_{mi}}{F_i^2},$$

где A_i – коэффициент сопротивления i -го участка трубопровода; ξ_{li} – коэффициент линейного сопротивления i -го участка трубопровода; ξ_{mi} – сумма коэффициентов местных сопротивлений [10] на i участке; F_i – проходная площадь сечения i участка, м^2 .

В наиболее распространённом случае, когда трубопровод состоит из труб с круглым сечением, величина $\xi_{ли}$ находится из выражения:

$$\xi_{ли} = \frac{\lambda_i L_i}{d_i},$$

где λ_i – коэффициент, зависящий от шероховатости трубы и числа Рейнольдса [8]; L_i, d_i – длина и диаметр i -го участка, м.

Как показали исследования О.В. Грудановой, Ю.В. Мисевич и Н.Ю. Пивоварова, тупиковая гидравлическая ветвь с N отводами-оросителями (рис. 4) в секции орошения стенки резервуара может быть представлена в виде эквивалентного гидравлического сопротивления A_{Σ} .

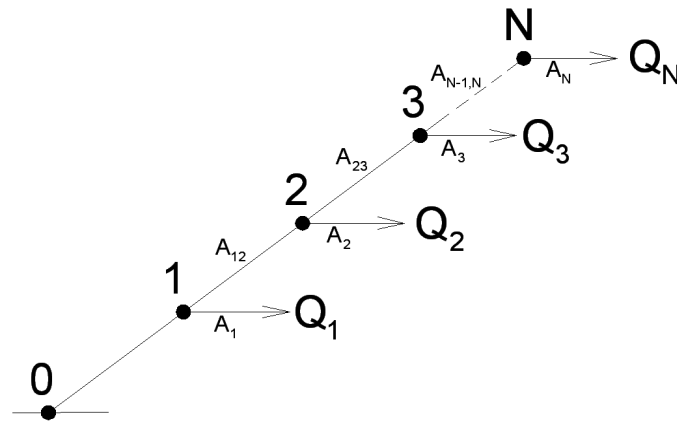


Рис. 4. Расчётная схема тупиковой гидравлической ветви

Величина A_{Σ} может быть найдена из выражения:

$$A_{\Sigma} = A_{01} + \frac{A_1}{C^2}, \quad (1)$$

где A_{01}, A_1 – коэффициенты сопротивления участка 0-1 и 1-го отвода (рис. 4); C – параметр, зависящий от коэффициентов сопротивления гидравлической ветви.

Величина C может быть найдена из выражения:

$$C = 1 + \sum_{j=1}^{N-1} \prod_{i=1}^j \frac{R_i}{1 + R_{i+1}},$$

где $R_i = \sqrt{\frac{A_i}{A_{i,i+1} + A_{i+1}(1 + R_{i+1})^{-2}}}$ при $i < N, R_N = 0$; A_i – коэффициент сопротивления i отвода.

В таблице приведены значения C и $\{R\}$ для гидравлической ветви с различным числом отводов N . В частном случае, когда сопротивления участков отсутствуют ($A_{i,i+1} = 0, i = 1, \dots, N$, «веерная» схема) и все отводы выходят из одного узла, выражение (1) упрощается:

$$A_{\Sigma} = A_{01} + \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{A_i}} \right)^{-2}.$$

Величины расходов Q_1, \dots, Q_N из отводов могут быть найдены из выражения (очевидно при одном отводе $Q_1=Q_0$):

$$Q_i = Q_0 \frac{\Pi_i}{C}, i=1, \dots, N, \quad (2)$$

где $\Pi_i = \prod_{j=1}^{i-1} \frac{R_j}{1+R_{j+1}}, i=2, \dots, N, \Pi_1=1.$

Таблица. Пример нахождения параметров C и $\{R\}$ при $N \leq 4$

N	C	$\{R\}$
1	1	–
2	$1+R_1$	$R_1 = \sqrt{\frac{A_1}{A_{12} + A_2}}$
3	$1 + \frac{R_1}{1+R_2} + \frac{R_1 R_2}{1+R_2}$	$R_1 = \sqrt{\frac{A_1}{A_{12} + A_2(1+R_2)^{-2}}}, R_2 = \sqrt{\frac{A_2}{A_{23} + A_3}}$
4	$1 + \frac{R_1}{1+R_2} + \frac{R_1}{1+R_2} \cdot \frac{R_2}{1+R_3} + \frac{R_1}{1+R_2} \cdot \frac{R_2 R_3}{1+R_3}$	$R_1 = \sqrt{\frac{A_1}{A_{12} + A_2(1+R_2)^{-2}}},$ $R_2 = \sqrt{\frac{A_2}{A_{23} + A_3(1+R_3)^{-2}}},$ $R_3 = \sqrt{\frac{A_3}{A_{34} + A_4}}$

Для «веерной» схемы выражение (2) приводится к виду:

$$Q_i = Q_0 A_i^{-0,5} (A_1^{-0,5} + A_2^{-0,5} + \dots + A_N^{-0,5})^{-1}, i=1, \dots, N. \quad (3)$$

В частности, для случая двух ($N=2$) отводов выражение (3) упрощается:

$$Q_1 = Q_0 \left(1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}\right)^{-1}; Q_2 = Q_0 \left(1 + \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}\right)^{-1}.$$

Из выражения (3) следует, что при равенстве расходов ($Q_i=Q_0/N, i=1, \dots, N$) должно соблюдаться равенство коэффициентов сопротивления: $A_1=\dots=A_N$.

С практической точки зрения можно рассмотреть крайний случай – когда задействованы все четыре секции с учётом подачи воды в огнепреградители. Полагая, что секции симметричны, достаточно рассмотреть ММ одной секции (рис. 5 а), сведя её к двухуровневой схеме (рис. 5 б), для которой справедливы выражения:

$$(A_{нк} + A_{0I})(Q_C + Q_{оп})^2 + A_{3I}Q_C^2 = p_0 - \rho g H_I, \quad (4)$$

$$A_{3I}Q_C^2 - (A_{32} + A_{I,II})Q_{оп}^2 = \rho g (H_{II} - H_I), \quad (5)$$

где $Q_{оп}, Q_C$ – расходы воды в огнепреградитель и ветвь орошения стенки, м³/с; H_I, H_{II} – высоты расположения секций орошения стенок и огнепреградителей относительно

коллектора, м; p_0 – исходное давление в коллекторе, Па; $A_{Э1}$, $A_{Э2}$ – эквивалентные гидравлические сопротивления ветви орошения и подачи в огнепреградитель; A_{0I} , $A_{I,II}$ – гидравлические сопротивления участков схемы (рис. 5 б); $A_{нк}$ – коэффициент, учитывающий падение давления в коллекторе и зависящий от НРХ насосов и количества задействованных секций.

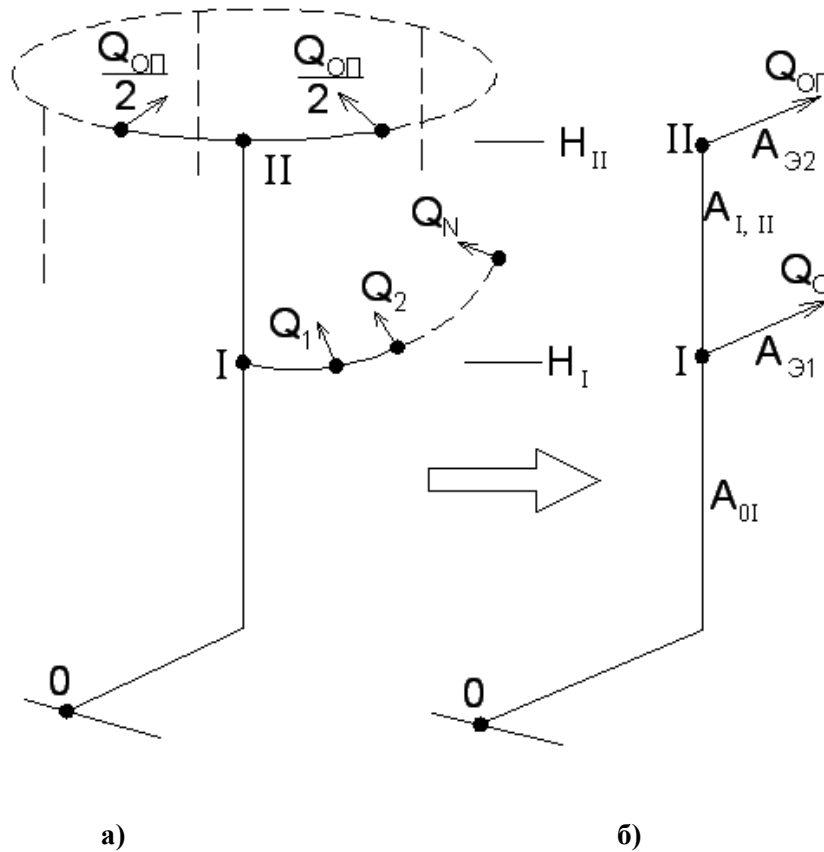


Рис. 5. Расчётная схема кольцевой гидравлической ветви

Анализ и синтез комбинированной гидросистемы

Анализ комбинированной гидросистемы ППЗ резервуара сведётся к решению системы уравнений (4) и (5) относительно расходов Q_C и $Q_{оп}$ при заданных значениях коэффициентов $A_{Э1}$, $A_{Э2}$, A_{0I} , $A_{I,II}$ и $A_{нк}$, высотах H_I , H_{II} и давлении p_0 . Величины Q_C и $Q_{оп}$ могут быть определены из выражений:

$$Q_c = \sqrt{(b + \sqrt{b^2 - ac})a^{-1}},$$

$$Q_{оп} = \sqrt{\frac{A_{Э1} - \rho g(H_{II} - H_I)}{A_{Э2} + A_{I,II}}},$$

$$\text{где } a = \left[A_{Э1} + (A_{нк} + A_{0I}) \left(\sqrt{\frac{A_{Э1}}{A_{Э2} + A_{I,II}}} - 1 \right)^2 \right] \left[A_{Э1} + (A_{нк} + A_{0I}) \left(\sqrt{\frac{A_{Э1}}{A_{Э2} + A_{I,II}}} + 1 \right)^2 \right],$$

$$b = \left[A_{\text{э1}} + (A_{\text{нк}} + A_{0I}) \left(\frac{A_{\text{э1}}}{A_{\text{э2}} + A_{I,II}} - 1 \right) \right] \rho g (H_{II} - H_I) \frac{A_{0I} + A_{\text{нк}}}{A_{\text{э2}} + A_{I,II}} +$$

$$+ \left[A_{\text{э1}} + (A_{\text{нк}} + A_{0I}) \left(\frac{A_{\text{э1}}}{A_{\text{э2}} + A_{I,II}} + 1 \right) \right] (p_0 - \rho g H_I),$$

$$c = \left[p_0 - \rho g H_I + \frac{A_{\text{нк}} + A_{0I}}{A_{\text{э2}} + A_{I,II}} \rho g (H_{II} - H_I) \right]^2.$$

В дальнейшем определяются расходы в оросители, ветвь орошения стенки Q_1, \dots, Q_N , для чего может быть использовано выражение (2) при условии $Q_0 = Q_C$.

Синтез комбинированной гидросистемы ППЗ резервуара может осуществляться по выражениям (4) и (5) несколькими способами при заданных расходах Q_C и $Q_{\text{оп}}$ и высотах H_I и H_{II} , например:

а) известны НРХ насоса и эквивалентные гидросопротивления $A_{\text{э1}}$ и $A_{\text{э2}}$, необходимо определить величины сопротивлений A_{0I} и $A_{I,II}$ и найти тем самым требуемые параметры вертикальных трубопроводов (внутренние диаметры, шероховатость стенок);

б) известны гидросопротивления $A_{\text{э1}}$, $A_{\text{э2}}$, A_{0I} и $A_{I,II}$, необходимо определить параметры НРХ насоса – p_0 и $A_{\text{нк}}$.

Задача «а» сводится к решению уравнения (4) относительно A_{0I} , а уравнения (5) – относительно $A_{I,II}$:

$$A_{0I} = \frac{p_0 - \rho g H_I - A_{\text{э1}} Q_C^2}{(Q_C + Q_{\text{оп}})^2} - A_{\text{нк}},$$

$$A_{I,II} = \frac{A_{\text{э1}} Q_C^2 - \rho g (H_{II} - H_I)}{Q_{\text{оп}}^2} - A_{\text{э2}}.$$

Задача «б» сводится к подбору наиболее приемлемых величин p_0 и $A_{\text{нк}}$ по выражению (4).

Таким образом, в данной работе рассмотрены возможность применения комбинированной гидросистемы ППЗ резервуара с ЛВЖ или ГЖ, позволяющей как орошать (охлаждать) стенки резервуара, так и подавать воду на орошение огнепреградителей для повышения их огнестойкости при пожаре. Для данной гидросистемы построена ММ и показана возможность с её использованием решения задач анализа и синтеза гидросистемы.

Литература

1. СП 155.13130.2013. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Изд-во Политех. ун-та, 2010.
3. Петрова Н.В., Чешко И.Д., Галишев М.А. Анализ практики экспертного исследования пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 3. С. 40–46.

4. Об утверждении Методики определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

5. ГОСТ Р. 53323–2009. Огнестойкие перегородки и противопожарные двери // Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

6. Артамонов В.С., Котов И.Ю., Хорошилов О.А. Огнестойкий: пат. Рос. Федерация 2431512; опубл. 20.10.2011. Бюл. № 29.

7. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. М.: ВНИИПО, 1999.

8. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.

9. Артамонов В.С., Груданова О.В., Таранцев А.А. Уточнённый порядок расчёта одноуровневых разветвлённых гидравлических сетей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. № 3. С. 77–83.

10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Энергия, 1975.

References

1. SP 155.13130.2013. Sklady nefti i nefteproduktov. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Garant».

2. Volkov O.M. Pozharnaya bezopasnost' rezervuarov s nefteproduktami. M.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2010.

3. Petrova N.V., Cheshko I.D., Galishev M.A. Analiz praktiki ehkspertnogo issledovaniya pozharov na ob"ektah hraneniya nefti i nefteproduktov // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii».1 2016. № 3. S. 40–46.

4. Об утверждении Методики определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

5. ГОСТ Р. 53323–2009. Огнестойкие перегородки и противопожарные двери // Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

6. Artamonov V.S., Kotov I.Yu., Horoshilov O.A. Ognestoykiy: pat. Ros. Federaciya 2431512; opubl. 20.10.2011. Byul. № 29.

7. Rukovodstvo po tusheniyu nefti i nefteproduktov v rezervuarah i rezervuarnykh parkah. M.: VNIPO, 1999.

8. CHugaev R.R. Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti). 4-e izd., pererab. i dop. L.: EHnergoizdat, 1982. 672 s.

9. Artamonov V.S., Grudanova O.V., Tarancev A.A. Utochnyonnyj poryadok raschyota odnourovnevnykh razvetvlyonnykh gidravlicheskih setej // Pozharovzryvobezopasnost'. 2008. № 3. S. 77–83.

10. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. M.: EHnergiya, 1975.