

УДК 614.842.65: 004.428

Прямой и обратный методы расчёта насосно-рукавных систем

Straight and reverse pump-hose systems computation methods

О.С. Малютин;

С.А. Васильев,
канд. тех. наук;

П.А. Осавелюк,
канд. тех. наук

*ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России*

O.S. Malyutin;

S.A. Vasilev,
Ph.D. of Engineering Sciences;

P.A. Osavelyuk,
Ph.D. of Engineering Sciences

*FSBEE HE Siberian Fire and
Rescue Academy EMERCOM
of Russia*

Аннотация:

В статье рассматриваются различные методы расчёта насосно-рукавных систем в пожарном деле. Делается акцент на приблизительном характере принятых методик. Вводятся понятия прямого и обратного метода расчета насосно-рукавных систем. Отмечены характерные для каждого метода достоинства и недостатки. Подробно рассматривается прямой метод расчета и дается сравнительный анализ результатов расчета сложных насосно-рукавных систем с использованием различных методов. Отдельно отмечается практическая значимость корректного расчета насосно-рукавных систем с точки зрения эффективности их составления и безопасности работы. В заключении сделан вывод о необходимости разработки специального программного обеспечения для расчета насосно-рукавных систем на основе изложенных методик, а также о необходимости обращать внимание на их корректное составление и расчет в процессе профессиональной подготовки сотрудников подразделений пожарной охраны.

Ключевые слова: пожарная охрана, пожарная тактика, пожарная техника, пожарные рукава, расчеты, формулы, насосы, насосно-рукавные системы.

Abstract:

The paper provides an overview of different pump-hose systems computation methods in fire service. Emphasis is placed on approximation features of using methods. Declared concepts of straight and reverse pump-hose systems computation methods. Marks specific for each of them pros and cons. Making detailed overview of straight computation method and taking comparative analyze of complex pump-hose systems computation with different methods results. Especially marked pump-hose correct calculation practice significance from point of view of its effective construction and safety work. In the end of paper making conclusion about special software for pump-hose systems computation based on described methods development necessity and although about necessity to pay attention for correct construction and computation of them during fire service employee professional education process.

Key words: fire service, fire tactic, fire technic, fire hoses, formulas, pumps, pump-hose systems.

Введение

Задача подачи требуемого количества огнетушащих веществ в зону горения является одной из ключевых при тушении пожаров. Успешное решение этой задачи - это одно из условий локализации пожара. Для

доставки воды от водоисточников к приборам подачи огнетушащих веществ (далее – ОТВ) применяются насосно-рукавные системы, состоящие из пожарных насосов, пожарных рукавов и собственно приборов подачи ОТВ (пожарных стволов). Поэтому вопросам расчета насосно-рукавных систем (далее – НРС) в пожарной тактике уделяется серьезное значение.

Наиболее простым методом расчета НРС является выработанный годами практики тушения пожаров приближенный способ оценки требуемого напора на насосе мобильного средства пожаротушения (далее – МСП).

Суть его заключается в утверждении, что на каждые 100 метров напорной рукавной линии напор в рукаве снижается на одну атмосферу (или 10 метров водяного столба) и на такое же значение на каждые 10 метров подъема рукавной линии. Этот способ широко применяется личным составом – рядовыми пожарными, водителями, командирами отделений. Он является крайне приблизительным и неточным, однако в условиях практической работы на пожаре позволяет быстро оценить требуемый напор на насосе мобильного средства пожаротушения.

В случаях, когда требуется более точный и обстоятельный расчет НРС, прибегают к более сложным методам, заключающимся в расчете потерь напоров в рукавных линиях с использованием известных законов гидравлики.

Эта статья посвящена изучению особенностей расчета НРС различной степени сложности с точки зрения разработки специального программного обеспечения для органов управления пожарными подразделениями.

Задачи расчета НРС (прямая, обратная, полная)

Исходя из целей расчета конкретных насосно-рукавных систем можно определить следующие элементарные задачи:

- определение предельного расстояния подачи огнетушащих веществ при заданном расходе огнетушащих веществ;
- определение требуемого количества напорных пожарных рукавов при заданном расходе огнетушащих веществ;
- определение требуемого напора на насосе МСП при заданном расходе огнетушащих веществ;
- определение предельно возможного расхода из приборов подачи ОТВ при заданном напоре на насосе МСП и длине напорных рукавных линий.

К этому списку, необходимо добавить, почти не упоминающуюся в литературе по пожарной тактике и технике, элементарную задачу определения

фактических расходов из пожарных стволов при заданном давлении на насосе МСП. Между тем, понимание фактических расходов ОТВ на пожаре крайне важно, как непосредственно на пожаре, так и в дальнейшем, при его разборе и анализе.

В повседневной деятельности – при составлении документов предварительного планирования, разработке методической документации по проведению пожарно-тактических занятий, анализе пожаров и так далее – используется тактико-технический метод расчета НРС. Достоинствами этого метода являются относительная простота и точность, что позволяет проводить расчет, не прибегая к помощи специального математического аппарата. Рассмотрим его более подробно.

Обратный метод расчета НРС

Анализ методик проведения расчетов НРС изложенных в работах [1, 2] показал, что в подавляющем большинстве задач предполагается, что значения требуемого расхода и напора на приборах подачи ОТВ известны заранее. А значит, расчет осуществляется именно исходя из их значений, т.е. в сторону насоса - противоположную направлению движения воды по рукавам. Поэтому тактико-технический метод уместно назвать методом обратного расчета НРС или обратной задачей расчета НРС. Соответственно, в случае, если мы решаем задачу расчета параметров НРС, отталкиваясь от известных значений напора на насосе МСП, т.е. в сторону, совпадающую с направлением движения жидкости, мы решаем прямую задачу расчета НРС, используя прямой метод расчета, о котором речь пойдет во второй части статьи.

Рассмотрим смешанную насосно-рукавную систему, изображенную на рисунке 1.

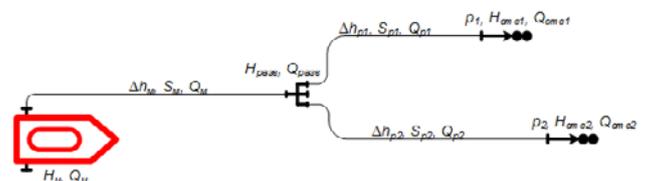


Рис. 1. Смешанная насосно-рукавная система

Приведенная НРС состоит из насосной установки пожарной автоцистерны, рукавного разветвления, магистральной рукавной линии, двух пожарных стволов и такого-же количества рабочих рукавных линий. Рабочие рукавные линии проложенные от разветвления могут иметь различные характеристики (длину, диаметр и материал рукава).

Основными параметрами НРС являются: расход ОТВ (Q_n) и напор (H_n). Расчет именно этих харак-

теристик применительно к различным элементам НРС как правило и представляет наибольший практический интерес при проведении расчетов.

Дополнительными параметрами являются:

- потери напора в рукавных линиях и гидравлическом оборудовании (Δh_n),
- гидравлические сопротивления (S_n),
- проводимость насадков приборов подачи ОТВ и гидравлического оборудования (p_n).

Это либо значения вычисляемые в процессе определения значений основных параметров, либо справочные значения известные заведомо.

Представим рассматриваемую НРС в виде направленного графа (Рис.2). Стрелками показано направление передачи переменных между элементами НРС в процессе расчета.

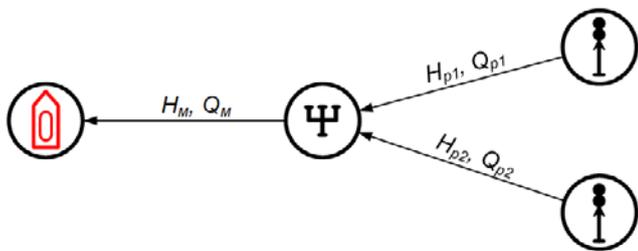


Рис. 2. Граф НРС при обратном расчете

В случае с обратным расчетом направление передачи значений расхода и напора совпадает.

При проведении расчета обычно принимается ряд допущений:

- предполагается, что напор на приборах подачи огнетушащих веществ является постоянной величиной и не зависит от параметров насосно-рукавной системы;
- не учитывается взаимное влияние различных элементов в сложных насосно-рукавных системах;
- на разветвлениях напор принимается согласно

максимально требуемого в рабочих рукавных линиях;

- для упрощения расчётов, потери напора в рабочих рукавных линиях проложенных после разветвлений безусловно принимаются равными 10 метрам.

Для большей точности предлагается последнее упрощение опустить и проводить расчет потерь напора в том числе и для рабочих линий. Тогда порядок расчета будет следующим:

1. Вычисляются потери напора в рабочих рукавных линиях:

$$\Delta h = S_p \cdot Q^2 \quad (1)$$

Гидравлическое сопротивление линии (S_l) определяется по формуле:

$$S_p = S \cdot n_p \quad (2)$$

где, S – гидравлическое сопротивление одного пожарного рукава (справочное значение); n_p – количество рукавов в рукавной линии.

2. Определяются требуемые напоры на входе в рабочие рукавные линии:

$$H_p = H_{ств} + \Delta h \quad (3)$$

3. Определяется максимально необходимый напор ($H_{разв}$) на разветвлении:

$$H_{разв} = \max(H_{p1}, H_{p2}) \quad (4)$$

4. По формуле 1 определяется потеря напора (Δh_m) в магистральной рукавной линии.

5. Определяется требуемый напор на насосе МСП:

$$H_p = H_{разв} + \Delta h_m \quad (5)$$

Изначальные значения расхода и требуемого напора на приборах подачи ОТВ принимаются согласно технической документации или рассчитываются согласно формулы:

$$Q_{ств} = p \sqrt{H_{ств}} \quad (6)$$

где, p – проводимость насадка ствола (справочное значение).

Результаты расчета НРС для различных значений напора на приборах подачи ОТВ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта обратным методом

$H_{ств1}, М$	$H_{ств2}, М$	$Q_{ств1}, л/с$	$Q_{ств2}, л/с$	$\Delta h_{p1}, М$	$\Delta h_{p2}, М$	$H_{p1}, М$	$H_{p2}, М$	$Q_{разв}, л/с$	$H_{разв}, М$	$\Delta h_m, М$	$Q_n, л/с$	$H_n, М$
60	60	4,6	4,6	5,4	10,8	65,4	70,8	9,1	70,8	6,2	9,1	77,0
55	55	4,4	4,4	4,9	9,9	59,9	64,9	8,7	64,9	5,7	8,7	70,6
50	50	4,2	4,2	4,5	9,0	54,5	59,0	8,3	59,0	5,2	8,3	64,2
45	45	3,9	3,9	4,0	8,1	49,0	53,1	7,9	53,1	4,7	7,9	57,8
40	40	3,7	3,7	3,6	7,2	43,6	47,2	7,4	47,2	4,1	7,4	51,3
35	35	3,5	3,5	3,1	6,3	38,1	41,3	7,0	41,3	3,6	7,0	44,9
30	30	3,2	3,2	2,7	5,4	32,7	35,4	6,4	35,4	3,1	6,4	38,5

В таблице жирным шрифтом выделены изменяющиеся параметры.

В качестве постоянных параметров НРС были установлены:

Таблица 2. Постоянные параметры расчета для рассматриваемой НРС

Кол-во рукавов в магистральной линии, ед.	Кол-во рукавов в 1-й рабочей линии, ед.	Кол-во рукавов во 2-й рабочей линии, ед.	Гидравлическое сопротивление рукавов в магистральной линии	Гидравлическое сопротивление рукавов в 1-й рабочей линии	Гидравлическое сопротивление рукавов во 2-й рабочей линии	Пропускная способность ствола 1	Пропускная способность ствола 2
n_m	n_1	n_2	$S_{рм}$	$S_{р1}$	$S_{р2}$	p_1	p_2
5	2	4	0,015	0,13	0,13	0,588	0,588

Подобный метод расчета широко применяется при расчете параметров насосно-рукавных систем любой сложности. Однако, несмотря на удобство проведения расчетов, решение обратной задачи имеет и ряд недостатков.

Так, например, нет возможности определить, как повлияют изменения параметров одного элемента НРС на параметры других элементов. Этот метод не позволяет оценить требуемые параметры работы насосной установки в зависимости от требуемого расхода ОТВ для тушения пожара. Определение же фактического напора и расхода из приборов подачи ОТВ при заданном напоре на насосе МСП и вовсе невозможно.

Прямой метод расчёта НРС

Прямой метод расчета позволяет избежать указанных недостатков, но представляется более сложным, так как предполагает необходимость расчета параметров НРС для каждой ветки рукавных линий, что ведет к появлению взаимного влияния элементов системы друг на друга и делает невозможным линейное решение.

Рассмотрим НРС, приведенную на рисунке 1. Представим, что система находится в статическом состоянии при напоре на насосе автоцистерны 40 м.вод.ст. Далее представим, что мы повысили напор на насосе до 80 м.вод.ст. Спустя какое-то время повысится результирующий напор на приборах подачи огнетушащих веществ. Рассмотрим одну из рабочих рукавных линий. Повышение напора приведет к повышению расхода из ствола. Это в свою очередь повлечет повышение потери напора, как в рабочей линии, так и в магистральной. Давление в них снизится, а значит, снизится и итоговый напор перед пожарным стволом, но уже не значительно. Постепенно начнутся затухающие колебания. Фактически, мы описали явление гидроудара. Но, это же описание, как нельзя лучше иллюстрирует и процесс расчета НРС в рамках прямого расчета. Становится очевидным, что для решения этой задачи потребуются множественные итерации с постепенным снижением энтропии системы и приближением ее к стационарному состоянию. А это значит,

что решение этой задачи без использования средств вычислительной техники представляется довольно трудоемким. При этом трудоемкость расчета системы зависит от ее сложности.

Далее рассмотрим собственно порядок решения прямой задачи. Для начала построим направленный граф НРС при расчете (Рис.3).

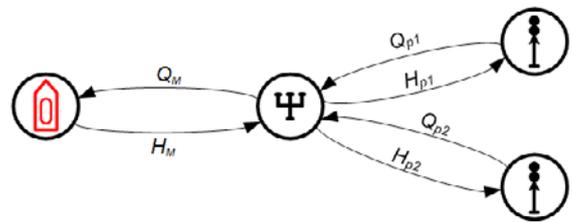


Рис. 3. Граф НРС при прямом расчете

Направление передачи значений расходов при прямом расчете не изменяется, т.к. их вычисление по-прежнему осуществляется в конечных вершинах графа – приборах подачи ОТВ (потребителях). А вот передача значений о напоре теперь происходит в направлении движения ОТВ, т.е. пожарных стволов (либо других потребителей – емкостей, пожарных автомобилей, гидроэлеваторов и т.д.).

Для решения составим систему уравнений описывающих состояние системы в целом:

$$\begin{cases} Q_{ств1} = p_1 \sqrt{H_{ств1}} \\ Q_{ств2} = p_2 \sqrt{H_{ств2}} \\ H_{ств1} = H_{разв} - \Delta h_{р1} \\ H_{ств2} = H_{разв} - \Delta h_{р2} \\ h_{р1} = n_1 S_{р1} Q_{ств1}^2 \\ h_{р2} = n_2 S_{р2} Q_{ств2}^2 \\ Q_{разв} = Q_{ств1} + Q_{ств2} \\ H_{разв} = H_H - \Delta h_M \\ h_M = n_M S_M Q_{разв}^2 \\ Q_H = Q_{разв} \end{cases} \quad (7)$$

Далее для решения этой системы уравнений воспользуемся методом компьютерного моделирования описанным в [3]. Постоянные параметры примем равными значениям, указанным в таблице 2. Результаты вычисления объединим в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты расчёта для прямого метода

$H_{н}, м$	$Q_{ств1}, л/с$	$Q_{ств2}, л/с$	$H_{ств1}, м$	$H_{ств2}, м$	$\Delta h_{р1}, м$	$\Delta h_{р2}, м$	$Q_{разв}, л/с$	$H_{разв}, м$	$\Delta h_{м}, м$	$Q_{н}, л/с$
77	4,7	4,5	64,7	59,8	5,8	10,8	9,3	70,5	6,5	9,3
70,6	4,5	4,4	59,3	54,8	5,3	9,9	8,9	64,7	5,9	8,9
64,2	4,3	4,2	54,0	49,9	4,9	9,0	8,5	58,8	5,4	8,5
57,8	4,1	3,9	48,6	44,9	4,4	8,1	8,0	53,0	4,8	8,0
51,3	3,9	3,7	43,1	39,8	3,9	7,2	7,6	47,0	4,3	7,6
44,9	3,6	3,5	37,7	34,9	3,4	6,3	7,1	41,1	3,8	7,1
38,5	3,3	3,2	32,4	29,9	2,9	5,4	6,6	35,3	3,2	6,6

В таблице жирным шрифтом выделены изменяющиеся параметры. В качестве исходных данных были использованы результаты расчета напора на насосе МСП полученные при решении обратной задачи.

Сравнение результатов

Результаты, полученные с использованием различных методов, объединены на диаграммах производительности насоса МСП (рис.4) и расходов из пожарных стволов (рис. 5).

Видно, что значения производительности насоса полученные при прямом методе расчета выше, чем результаты, полученные при обратном методе. При этом расход из стволов при обратном расчете почти совпадает со значением расхода одного из стволов при прямом расчете. Разница между этими значениями составила от 0,12 л/с при напоре на насосе 28,5м.вод.ст. до 0,17л/с при напоре 77м.вод.ст. (Табл.4). При этом разница тем существеннее, чем выше напор, но во всех случаях не превышает 1,8%, что в целом является незначительным.

Таблица 4. Разница расходов из насоса МСП

$H_{н}, м$	$Q_{н1} (обратный), л/с$	$Q_{н2(прямой)}, л/с$	$Q_{н2}-Q_{н1}, л/с$	$Q_{н2}/Q_{н1}, \%$
77	9,11	9,28	0,17	101,8
70,6	8,72	8,88	0,16	101,8
64,2	8,32	8,47	0,16	101,8
57,8	7,89	8,04	0,15	101,8
51,3	7,44	7,57	0,13	101,8
44,9	6,96	7,08	0,13	101,8
38,5	6,44	6,56	0,12	101,8

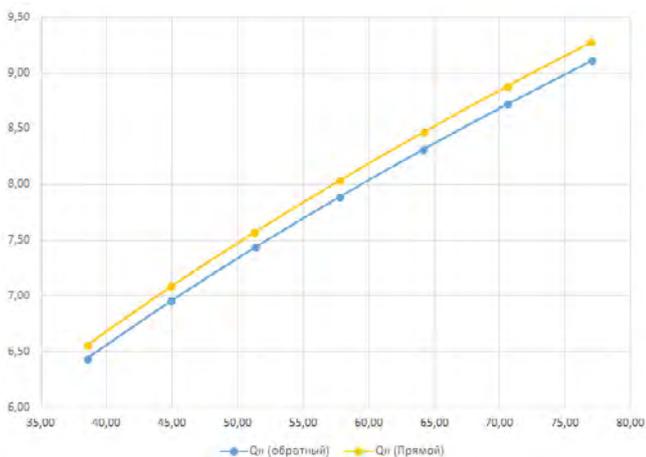


Рис. 4. График изменения расчётного значения расхода насоса в зависимости от напора.

Объясняется эта разница тем фактом, что при обратном расчете производится вычисление только для одной рабочей линии – все прочие, по - умолчанию, принимаются равными расчетной. Однако, в действительности это не так и прямой метод расчета это наглядно показывает. Напор на выходе из разветвления будет одинаков для всех рабочих линий. При обратном методе мы производим расчет для максимально требуемого напора в рабочих линиях, таким образом, гарантируя работоспособность линии. Однако, поскольку для прочих рукавных линий подается напор больше требуемого для их работы, то за вычетом потерь напора в рабочих рукавных линиях напор, который создается перед приборами подачи ОТВ будет выше, а значит и расход больше.

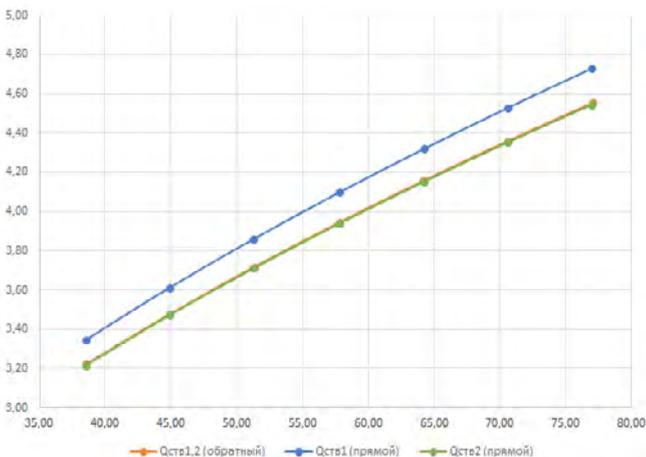


Рис. 5. График изменения расчётных значений расхода из приборов подачи ОТВ, в зависимости от напора на насосе МСП

Таким образом, очевидно, что прямой метод расчета является более точным по сравнению с обратным. При этом его точность тем выше, чем больше разница потерь напоров в параллельных рукавных линиях отходящих от разветвлений.

Для проверки корректности этого вывода был проведен ряд вычислений для различных НРС. Результаты этих вычислений приведены в таблице 5. Соответствующие им схемы НРС представлены на рисунках 6 и 7.

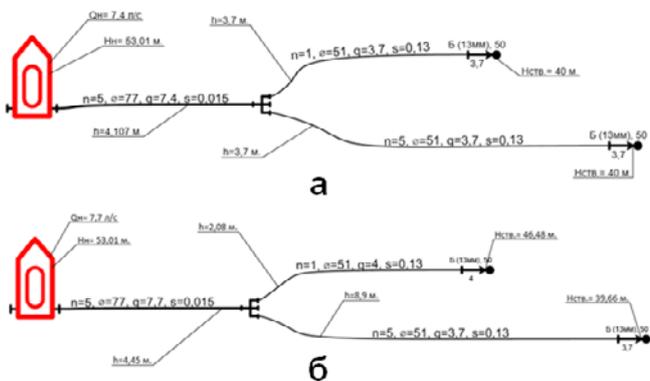


Рис. 6. Проверочная НРС №1 с двумя рабочими линиями. Приборы подачи ОТВ имеют одинаковые характеристики.
 а – обратный расчет; б – прямой расчет

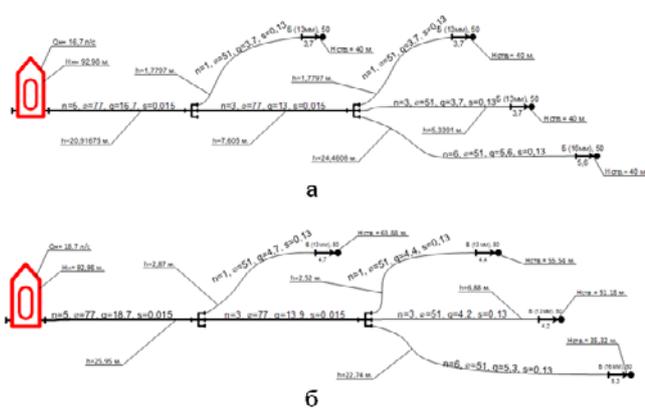


Рис. 7. Проверочная НРС №2. Состоит из нескольких магистральных и рабочих линий, приборы подачи ОТВ имеют различные характеристики.
 а – обратный расчет; б – прямой расчет

Таблица 5. Сравнение результатов расчёта НРС приведенных на рисунках 6 и 7 при решении прямой и обратной задачи расчёта

Номер схемы	Обратный расчет		Прямой расчет		$Q_{H2}/Q_{H1}, \%$
	$Q_{H1}, \text{л/с}$	$H_{H1}, \text{м}$	$Q_{H2}, \text{л/с}$	$H_{H2}, \text{м}$	
1*	7,4	53,01	7,7	53,01	104,05%
2*	16,7	92,98	18,7	92,98	111,98%

Результаты проверочного расчета НРС подтверждают изложенное выше утверждение о том, что точность при прямом расчете увеличивается по мере усложнения схемы НРС. Так, для схемы, изображенной на рисунке 6 прямой расчет точнее на 4% (разница 0,3л/с), в то время как для более сложной схемы изображенной на рисунке 7 точность

приближается к 12% (разница 2 л/с), что при тушении реальных пожаров может иметь значение.

Кроме того, схема №2 (Рис.7) показывает немаловажный аспект работы с насосно-рукавными системами на реальных пожарах: при прокладке сложных НРС состоящих из рукавных линий с различными параметрами (длина, материал и диаметр пожарных рукавов) может сложиться ситуация, при которой перед отдельными приборами подачи ОТВ может быть создан напор, превышающий его нормативные (и ожидаемые ствольщиком) значения, что, в свою очередь, может привести к выходу из строя напорные рукава или травме участников тушения пожара. Такую ситуацию порой приходится наблюдать при тушении пожаров, когда бездумное наращивание рукавных линий приводит к существенной разнице напоров в различных ветвях одной и той же НРС, и как следствие - различным значениям расхода и длины компактной части струй. Такая ситуация может быть усугублена применением в одной НРС приборов подачи ОТВ с различными нормативными рабочими напорами. Например, при применении стволов с гладкоствольными насадками типа РС-50 (нормативный напор 40м) и современных стволов с кольцевыми распыляющими насадками типа СРКУ-8, СРКУ-70А (нормативный напор 60м).

Заключение

Приведенные сведения показывают, что тактико-технический метод расчета, решающий обратную задачу расчета НРС имеет достаточно высокую точность, что в сочетании с простотой делает допустимым его применение при проведении «быстрых» расчетов непосредственно в деятельности органов управления на пожаре. Вместе с тем, применимость его ограничена простыми схемами НРС. В случаях, когда речь идет о сложных насосно-рукавных системах, комбинирующих рукавные линии с различными гидравлическими характеристиками, прямой метод расчета является предпочтительным. Кроме того, в процессе подготовки должностных лиц на пожаре (РТП, начальники тыла, боевых участков и секторов) необходимо обращать внимание на особенности составления, работы и расчета сложных гидравлических систем, так как это связано с эффективностью боевых действий по тушению пожаров и безопасностью участников тушения пожаров.

С точки зрения пожарной гидравлики, прямой метод расчета также представляет интерес как инструмент для изучения явления гидроудара в НРС. Он позволяет оценить динамику изменения параметров системы во времени, при изменении того или иного показателя.

Наконец, прямой метод расчета может быть использован для расчета гидравлических параметров при проектировании систем противопожарного водоснабжения или водопровода автоматических систем водяного пожаротушения.

Вместе с тем, сложность прямого метода подразумевает создание специальных программных средств. В настоящее время в ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России обратный метод расчета реализован в автоматизированной информационно-графической системе (АИГС) «ГраФиС-Тактик». Для расчета же НРС с использованием прямого метода создана специальная версия данного решения АИГС «ГраФиС-НРС», включенная в общий пакет поставки. Система активно используется в подразделениях ГПС МЧС России и учебном процессе Академии.

Литература:

1. В.В. Тербнев, М.А. Шурыгин, Т.Н. Атаманов, М.В. Илеменов «Шпаргалка» РТП. Расчет параметров насосно-рукавных систем с помощью таблиц, Екатеринбург: ООО «Издательство «Калан», 2014.
2. Тербнев В.В., Расчет параметров развития и тушения пожаров (Методика. Примеры. Задания) – Екатеринбург: ООО «Издательство «Калан», 2012. – 460с.
3. Малютин О.С. Компьютерное моделирование сложных насосно-рукавных систем / Малютин О.С. //Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций Сборник статей по материалам VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 68-75.