

УДК 622.234.5

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУЙНЫХ ПОТОКОВ

Стась С. В., Шкарабура Н.Г.

Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля, м. Черкаси
Яхно О.М.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

01056, г. Киев, просп. Победы, 37

E-mail: Salenko2006@ukr.net

Введение. В нашей стране вопросами изучения струй низкого давления, которые используются при аварийно-спасательных работах, прежде всего при пожаротушении, занимаются группы специалистов, в состав которых входят ученые-физики, гидравлики, математики, и, наконец, практические работники из подразделений МЧС Украины. Нужно отметить, что последние годы ознаменовались получением ряда важных научных результатов в области создания высокоэффективной пожарной техники. Прежде всего, речь идет о начале создания некоей научной области, именуемой струйной технологией пожаротушения.

Мировые тенденции создания новой мощной специальной техники (будем использовать термин – пожарная техника) дают возможность сделать ряд важных выводов. Во-первых, и сейчас, и в прошлые годы подавляющее число пожаров ликвидируется посредством использования воды. Во-вторых, несмотря на значительный прорыв в области создания новых средств пожаротушения и технологий их применения, в ближайшем будущем можно ожидать продолжение превалирования использования воды в качестве основного средства пожаротушения. В-третьих, разнообразность типов пожаров, мест их возникновения, сложность прогнозирования процесса развития пожара в каждом конкретном случае, делают невозможным, или, по крайней мере, минимизируют возможность создания устройств и механизмов, позволяющих одинаково эффективно использовать одну и ту же технику в разных случаях пожаротушения. Создание пожарного автомобиля «на все случаи жизни» невозможно в силу необходимости использования различных технологий и тактик пожаротушения в возможных пожарах одного и того же района выезда конкретной пожарно-спасательной части.

Поэтому до сего времени во всем мире базовым техническим средством, используемым при проведении аварийно-спасательных работ остается автоцистерна. Как правило, это автомобиль, имеющий емкость для перевозки воды от 2 до 14 т., емкость для пенообразователя до 300 кг, специальное пожарно-техническое оборудование, а также имеющий 3-8 специально оборудованных мест для персонала, доставляемого к месту проведения аварийно-спасательных работ. Вместе с этим, соотношение воды, «пролитой» на месте пожара, к той, которая использовалась для его тушения, в большинстве случаев составляет 19:1. Спасатели из США, Великобритании и Швеции могут похвастаться соотношением 5:1. Испаряясь, вода, как средство тушения имеет теоретическую способность охлаждения равную 2,6 МВт/сек. В действительности такая мощность достигается путем использования значительно большего количества воды. Полное использование громадной охлаждающей мощности воды возможно лишь в случае, если она полностью испаряется в очаге пожара [1-7].

Цель работы. Сформировать схему, позволяющую передать энергию от двигателя пожарной машины до места окончательного распыла струи, исходя из требований минимума изначальной энергии.

Поскольку основными элементами гидравлических схем системы формирования струйных потоков являются генераторы давления и системы их управления, устройства, обеспечивающие создание пульсации потока определенной частоты, регулирующая и подводящая к стволу гидравлическая система и, наконец, сам ствол, то схема может быть представлена следующим образом (рис. 1).



Рисунок 1 – Принципиальная схема системы формирования струйных потоков

Матеріал і результати досліджень. Система формування струйних потоків устатковується на автомобілях з певними характеристиками, тому гідролічна система може суттєво залежати від цих характеристик (потужність привода насосної станції і т.д.). Все це вказує на те, що зростає значимість техніко-економічних досліджень по визначенню оптимальних параметрів і структури струйного обладнання. Пропонується використовувати ексергетичний метод для дослідження механічних систем струйної техніки [8-10].

Представлена на (рис.1) схема дає можливість зрозуміти значимість кожного блоку в формуванні системи передачі енергії від двигача автоцистерни, до моменту повного розпилення струї і потрапляння її в очаг пожеги. Ефективність роботи кожного блоку і, як наслідок, ефективність роботи всієї системи імпульсного пожеготушення, в першу чергу, залежить від характеру впливу гасячого речовини на очаг пожеги. Розгляд схеми, представленої на (рис.1), дає можливість зрозуміти доцільність використання ексергетичного методу для дослідження механічних систем струйної техніки. Більшість двигачів, виробляючих енергію, в наслідок передаванню генератором тиску (насосам) має КПД, приблизно рівний 0,35. Існуюча система передачі енергії від двигача до генератора тиску, що використовує коробку вибору потужності, коробку переключення передач, систему валів, дозволяє здійснити передачу всього 30% початкової потужності двигача. Пристрій, що забезпечує пульсацію, призводить до падіння потужності в межах 3-15%. Система управління потоком і гідролічний ствол також знижують потужність (відповідно - 0,9 і 0,95).

Таким чином, спрощена схема, представлена на рис. 1 дає можливість стверджувати, що існуюча система формування струйних потоків, що використовується в вітчизняній пожежній техніці, дозволяє передавати тільки 9% енергії, яку можна було б отримати в якійсь ідеальній системі генерування потоків:

$$K_{\text{общ}} = K_{\text{двиг}} \cdot K_{\text{насос}} \cdot K_{\text{пульс}} \cdot K_{\text{управл}} \cdot K_{\text{ствол}} = 0,35 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \approx 0,09.$$

Такий рівень спроможності системи (найближчий до терміна ексергія), ніяким чином не може задовольняти як розробників пожежної техніки, так і самих рятувальників, оскільки більшість нині експлуатуваних автоцистерн, внаслідок вказаних вище причин, не забезпечують номінальних режимів роботи встановлених на них пожежних насосів.

Ексергетичний метод аналізу. Практично всі існуючі гасячі речовини викликають комплексне вплив на процес припинення горіння, ніякому з них притаманне основне гасяче властивість. Вкажемо лише, що для

води основним гасячим властивістю є охолодження зони горіння. Розпилені струї забезпечують більший в порівнянні з плоскими струями гасячий ефект, в основному, за рахунок різкого збільшення площі поверхні одночасного рівномірного охолодження і випаровування крапель.

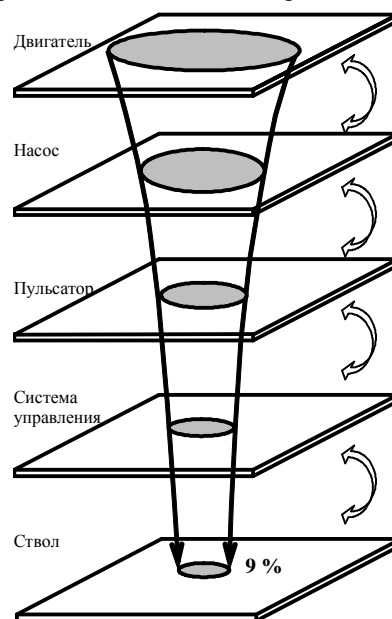


Рисунок 2 – Зменшення ексергії в існуючій системі генерування потоків

В ексергетичному методі аналізу є можливість взяти не тільки кількість, ніяк і якість потоків енергії (потоків, об'єктивно даючих термодинамічну оцінку системи). Даний підхід є універсальним, т.к. дозволяє зробити оцінку використання всіх видів енергії, починаючи з енергії, що подається двигачем автомобіля на пожежну установку до енергії, що вилітає з струї. По суті, складається баланс розглядаємої енерготехнічної системи. Метод має наочність і простоту. Крім того, метод дає можливість здійснювати зв'язок між ексергетичними і техніко-економічними характеристиками системи.

На основі даного методу існує можливість вибору критеріїв ефективності при оцінці і оптимізації системи гідропривода пожежного обладнання.

Наконець, слід зауважити, що даний метод аналізує тільки ту частину енергоресурсів (потік роботи, маса робочих тіл, теплота і т.д.), яка є спроможною.

Використовуючи перший і другий закони термодинаміки можна скласти рівняння ексергії.

Якщо втрати ексергії як критерій необоротності процесу визначаються по формулі:

$$P = T_o \Delta S_{\Sigma} = 0, \tag{1}$$

де T_o – температура оточуючої середовища;

ΔS_{Σ} – суммарное изменение энтропии ($\Pi = 0$ – обратимый процесс, $\Pi > 0$ – необратимый процесс), тогда для реальных процессов справедливо [8,10]:

$$E_{\Sigma}^{ex} = E_{\Sigma}^{6bx} + \Pi, \quad (2)$$

$$E^P = E^H + \Pi, \quad (3)$$

где E_{Σ}^{ex} , E_{Σ}^{6bx} – суммарные эксергии всех потоков энергоресурсов на входе и выходе из системы;

E^P – затрачиваемая энергия;

E^H – используемая (полезная) энергия.

Существует ещё и транзитная энергия E_k , которая является соответствующим «балластом» в суммарных потоках эксергии на её выходе и входе, т.е.

$$E_k = E_{\Sigma}^{ex} - E^P = E_{\Sigma}^{6bx} - E^H. \quad (4)$$

Так как эксергия потока работы E_N равна самой работе

$$E_N = N = m \cdot e_{mex}, \quad (5)$$

где m – масса рабочего тела;

e_{mex} – удельная техническая работа;

а энергия потока кинетической энергии

$$E_k = \frac{mu^2}{2}, \quad (6)$$

и тепловой поток

$$E_{\phi} = \left(I - \frac{T_o}{T_u} \right) \Phi, \quad (7)$$

где T_u – среднетермодинамическая температура, то не представляет труда составление уравнения эксергетического баланса.

Кроме того, из соотношений (2) и (3) можно получить выражение КПД любого процесса, происходящего в устройстве:

$$h_{ex} = \frac{E^H}{E^P} = I - \frac{\Pi}{E^P}$$

Так как потоки эксергии могут быть легко рассчитаны по формулам (5-7) в зависимости от вида потока (работа, теплота, поток массы), то не сложно определить сумму потоков эксергии на входе и выходе E_i^{ex} и E_i^{6bx} для каждого i -го элемента схемы (рис. 1).

Термоэкономический критерий оптимальности системы может быть определен

$$K_{px} = \left[\frac{\sum_n \Pi_n \Pi_n - \bar{K}_n}{\sum_K e_K} \right], \quad (8)$$

где Π_n, Π_n – стоимость и годовое потребление энергии из внешних источников;

\bar{K}_n – годовые капитальные и другие затраты в n -м элементе схемы;

e_K – годовой расход эксергии для получения k -го продукта.

Следовательно, задача оптимизации сводится к поиску экстремума рассмотренной функции ($\min K_{p\Sigma}$).

Если задача оптимизации однокритериальная, то функция $\Phi(x)$ – основной критерий, остальные критерии принимаются как определенные ограничения. Тогда экстремальное значение рассматриваемой функции находится в рамках, приведенных ограничений и в определенной области пространства параметров.

Кроме того, возможно, что вместо единственного обобщенного критерия $\Phi(x)$ рассматриваются, как исходные, несколько показателей $\Phi_1(x)$, $\Phi_2(x) \dots \Phi_n(x)$, которые не полностью определяют характеристики машин или оборудования пожарной техники.

В связи с этим, для получения обобщенного критерия $\Phi(x)$ следует воспользоваться соотношением:

$$\phi = \sum_{s=1}^k P_s \Phi_s, \quad (9)$$

где величина S принимает значения 1,2... k ;

P_s – весовые коэффициенты, которые назначают разработчики машин.

На практике могут использоваться и более сложные, системы формирования струйных потоков, чем схема представленная на (рис. 1). Например, системы с использованием двухфазных сред. В этом случае возникает необходимость применения смесителей (эжекторов) формируемых течение среды. Возникают особенности в описании их характеристик и оценки их экономичности.

Двухфазные потоки. Целью исследований двухфазных потоков есть моделирование их течения в цилиндрическом канале для выявления особенностей и отличий таких течений от однофазных.

$$1 - U = 2,92 \text{ м/с}, 2 - U = 3,48 \text{ м/с},$$

$$3 - U = 4,09 \text{ м/с}, 4 - U = 4,79 \text{ м/с}, 5 - U = 5,37 \text{ м/с}$$

Данные особенности потока на выходе из насадка необходимо учитывать при расчете характеристики струи. К сожалению, неравномерность распределения концентрации частиц и несимметричность эпюры скоростей при расчете параметров двухфазной струи не учитываются. В качестве расчетной схемы, обычно принимается схема, представленная на (рис. 3) [23].

В соответствии с данной схемой скорость потока в струе U_{cmp} может быть представлена как функция ряда параметров, таких как плотность воды γ , масса усредненной частицы порошка m , r_0 – радиус усредненной частицы (предполагаем, что частицы имеют сферическую форму); давление воды перед пожарным стволом P_0 ; длина подающего порошок канала l_k ;

диаметров ствола и подающего порошок канала d_0 и d_k ; диаметр и длина зоны смешения порошка с жидкостью (или газом) D и Z ; угол наклона; $R_{абр}$ - радиус канала подводящего абразив расположенного под углом e относительно ствола.

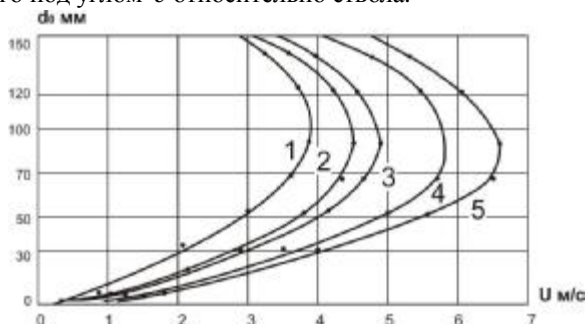


Рисунок 3 – Несимметричность эпюры скоростей

$$U_{смр} = f(p, m, r_0, d_0, d_k, l_k, D, Z, w, R_{абр}) \quad (10)$$

Аналогичным образом может быть представлена и функция для определения плотности $r_{см}$ в струе.

Воспользовавшись π -теоремой, Лукач Ю.Е. и Ануфриев В.А., получили соотношение:

$$\frac{r_{см}}{r} = f_2 \left(\frac{m}{pr_0^2 r}, \frac{2r_0}{d_0}, \frac{D}{d_0}, \frac{d_k}{d_0}, \frac{Z}{d_0}, e \right) \quad (11)$$

Как видно из данных соотношений, основной критерий, характеризующий гидродинамику двух-

фазной струи – это критерий $K_{см} = \frac{m}{pr_0^2 r}$ (что ка-

сается левой части первого соотношения (11), то

здесь находятся критерий Эйлера $\frac{p_0}{0,5rU_{смр}^2} = Eu$).

Критерий $K_{см}$ включает в себя массу частиц порошка и должен учитываться при определении траектории движения струи. На основании экспериментальных исследований необходимо определить, в какой степени этот критерий влияет на длину струи и какой вид имеет соотношение между $l_{смр}$ и $K_{см}$.

Кроме того, на длину струи будет оказывать влияние и неравномерное распределение скоростей на выходе из насадки, степень неравномерности которого можно оценить с помощью соответствующего коэффициента, представляющего собой соотношение между локальной скоростью потока на оси струи $U_{осу}$ и максимальной скоростью

$$U_{\max}, \text{ т.е. } \frac{U_{осу}}{U_{\max}}.$$

Реализация двухфазных потоков в пожарных стволах может быть осуществлена различным образом. Одним из наиболее эффективных способов является способ, связанный с использованием эжектора с автоматическим регулятором концентрации

порошка в воздушном (или водном) потоке. В качестве примеров таких установок представим схемы эжекторных смесителей разработанных проф. Губаревым А.П. (рис. 4 и рис. 5). Основными структурными элементами схемы представленной на рис. 4, являются: ствол и эжекторный смеситель с пневматическим приводом регулирования подачи порошка.

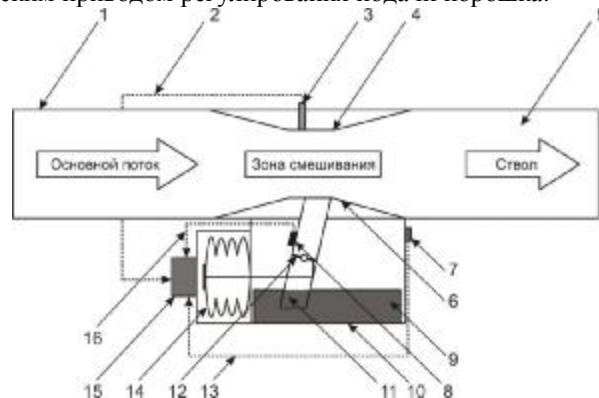


Рисунок 4 – Схема эжекторного смесителя «воздух-порошковая смесь» с пневматическим приводом регулирования подачи порошка:

1 – воздуховод; 2 – сигнал от датчика давления; 3 – датчик давления; 4 – сужение канала воздуховода; 5 – переход к стволу; 6 – зона всасывания порошка; 7 – клапан впуска воздуха; 8 – датчик расхода; 9 – масса порошка; 10 – контейнер с порошком; 11 – трубопровод забора порошка; 12 – поворотная заслонка; 13 – сигнал от клапана впуска воздуха; 14 – сильфонный пневмопривод; 15 – блок сравнения сигналов и управления (аппаратный или контроллер); 16 – сигнал от датчика расхода.

Другой схемой с аналогичным назначением является схема ствола с эжекторным смесителем (рис. 5).

Пожарные стволы специального назначения. Щелевой ствол равного сопротивления по ширине.

В соответствии с рис. 6, проектирование указанного ствола связано с определением значения изменения ширины щели по её длине с тем, чтобы во всех точках сечения сопротивления были одинаковы. Это возможно, если ширина H будет определенным образом изменяться, увеличиваясь к краям сечения. В этом случае нужно определить функцию $H(j)$ при условии равенства 12 индекса разнотолщинности ΔI .

Если рассматривать линии тока в расширяющейся части ствола, то можно заметить, что i -тая линия тока по длине меньше чем $(i+1)$ -я, т.е.

$$(l_{i+1} + Z) > (l_i + Z)$$

В то же время период давлений во всех линиях тока одинаков $\Delta p = p_{цил} - p_0$. Расход жидкости на периферии q_{i+1} и в центре q_0 различны. Тогда заданный индекс разнотолщинности можно записать в

$$\text{виде } \Delta I = \frac{q_{i+1}}{q_0}.$$

Но длина линии тока рассматриваемого ствола может быть определена как

$$(Z+l_i) > \left(Z + \frac{l_0}{\cos j_i} \right)$$

а расход – соответственно

$$q_i = \frac{1}{2} \frac{m}{2} H^3 \left[\frac{p}{Z + \left(\frac{l_0}{\cos a} \right)} \right]$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \frac{m}{2} H^3 \left[\frac{p}{Z+l_0} \right]$$

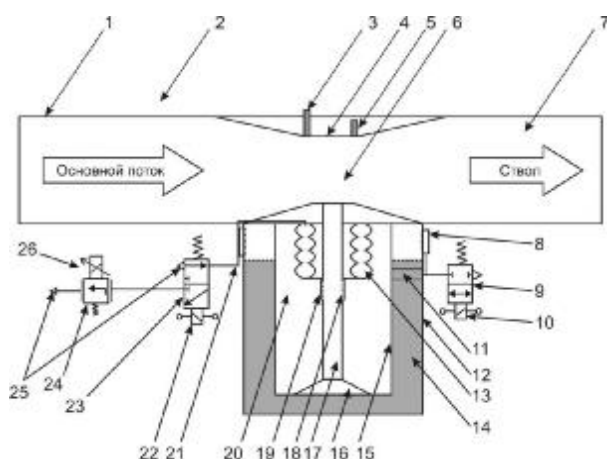


Рисунок 5 – Схема эжекторного смесителя «воздух-порошковая смесь» с пневматическим приводом регулирования подачи порошка:

1 – воздуховод; 2 – сигнал от датчика давления; 3 – датчик давления; 4 – сужение канала воздуховода; 5 – датчик расхода; 6 – зона всасывания порошка; 7 – переход к стволу; 8 – дроссель компенсации понижения давления над порошком; 9 – клапан впуска воздуха (релейный, моностабильный); 10 – электромагнит управления клапаном 9; 11 – канал, соединяющий клапан 9 с полостью 20; 12 – контейнер с порошком; 13 – сильфонный пневмопривод; 14 – массив порошка; 15 – разделительная оболочка; 16 – всасывающий патрубок; 17 – трубопровод забора порошка; 18 – дроссельные окна в стенках трубопровода 17; 19 – заслонка, закрепленная на сильфоне 13; 20 – камера; 21 – трубопровод, соединяющий клапан 23 с полостью сильфона 13; 22 – электромагнит управления клапаном 23; 23 – клапан управления сильфонным приводом (релейный, моностабильный); 24 – пропорциональный клапан давления; 25 – соединения с атмосферой; 26 – пропорциональный магнит управления клапаном 24.

В этом случае индекс разнотолщинности можно будет определить как величину

$$dl = \left(\frac{Z+l_0}{Z + \frac{l_0}{\cos a}} \right)$$

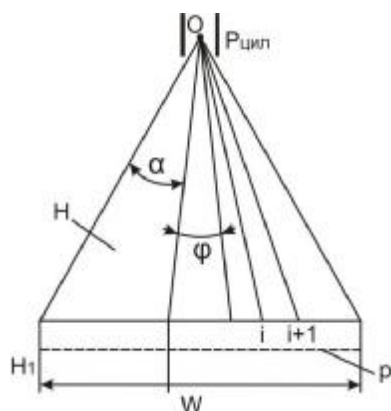


Рисунок 6 – Схема ствола специального назначения

Имея очевидную взаимосвязь между углом j и изменяющейся шириной выходной струи h в виде $h=l_0 \operatorname{tg} j$ (рис. 7) можно составить представление о значении $h-H$, которое будет руководящим для выполнения соответствующего канала. Используя данный метод выравнивания расхода с помощью изменения высоты щели можно получить струеформирующий ствол типа «рыбьего хвоста». В этом случае, вытекающая из подобного ствола жидкость, во всех сечениях щели будет иметь одинаковый расход, однако, вследствие переменной высоты щели – различную толщину и линейную скорость.

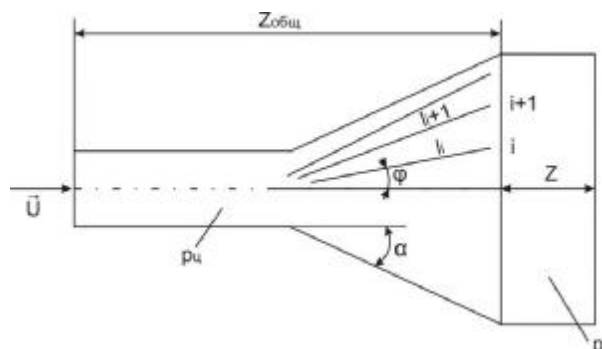


Рисунок 7 – Схема ствола, формирующего струю, с выходом типа «рыбий хвост».

Выводы.

1. Весьма важными в оценке выбора рационального режима работы гидравлической системы формирования пожарной струи являются эксергетические критерии. Определение основных критериев одно- и двухфазных гидравлических струй дает возможность найти связь между ними на основании результатов физического моделирования.

2. Представленный анализ дает возможность сделать оценку экономической целесообразности ис-

пользования того или иного оборудования, которым оснащаются пожарные комплексы.

3. Таким образом, экономичность системы формирования струйных потоков пожарного автомобиля состоит из целого ряда составляющих, одним из важнейших среди которых есть ствол специального назначения.

4. Сделанные выше обобщения могут быть значимым основанием для следующего утверждения. Разрабатываемая система (рис. 1) формирования струй должна быть не только эффективной с позиций пожаротушения, но и целесообразной с экономической точки зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brammer & Wise - FIRE Journal Australia. November 2002.
2. Deputy Chief Thomas Dunne (FDNY). Fire Engineering Magazine. December 2002.
3. Dr. Frederick B. Clarke, "Fire Hazards of Materials, An Overview", NFPA Handbook, 17th Edition 1991, NFPA, Quincy, MA, p. 3-15.
4. Dr. M Thomas. Report into the Blaina Fire. 1996.
5. Floyd W. (Bill) Nelson, QUALITATIVE FIRE BEHAVIOR, International Society of Fire Service Instructors, Staunton, VA, 1991.
6. Howard W. Emmons, "Fire and Fire Protection", SCIENTIFIC AMERICAN, July 1974.
7. Keith Royer, WATER FOR FIREFIGHTING, Engineering Extension Service, Iowa State University, 1959, Bulletin No 18, Ames, IA, p. 2.
8. Bejan A. Tsatsaronis G. Moran M., 1996 Thermal Design and Optimization, John Wiley & Sons Inc. New York.
9. Бродянский В. Фратшер В. Милек К. Эксергетический метод и его применение. – М.: Энергоиздат, 1988.
10. Эксергетические расчеты технических систем: справочное пособие / Бродянский В.М. Верховнер Г.П. Карчар Я.Я. и др. Под ред. А.А. Доминского, В.М. Бродянского – К: Наукова думка, 1991. – 360 с.
11. Hinze Y.O.: Critical speed and sizes of liquid globules//J. Appl. Sci. Res., 1948, 1, №4, p. 274—288.
12. Gordon G.D. Mechanism and speed of breakup of drops.// J. Appl. Phys., 1959, 30, №11, p. 1759—1761.
13. Dodd K.N. On the disintegration of water drops in air stream // J. Fluid Mech., 1960, 9, № 2, p. 175—182.
14. Simons G.A. Liquid drop acceleration and deformation // AIAA Journal. 1976, 14, № 2, p. 278—280.
15. Li M.K., Fogier H.S. Acoustic emulsification. Part 2. Break up of the large primary oil droplets in a water medium // J. Fluid Mech., 1978, 88, № 3, p. 513—528.
16. Бородин В.А., Дитятин Ю.Ф., Ягодкин В.И. О дроблении сферической капли в газовом потоке // Ж.: Прикл. мех. техн. зиф. — 1962. — № 1. — С. 85—92.
17. Вольнский М.С., Линашов А.С. Деформация и дробление капель в потоке газа // Инж. Физ. Ж. — 1970. — №5. — С. 838—843.
18. Гонор А.Л., Золотова Н.В. Торможение и деформация жидкой капли в потоке газа // АН СССР. Мех. жидкости и газа. — 1981. — № 2. — С. 58—69.
19. Яхно О.М., Булгаков В.М., Войтюк Д.Г. Дробление капель жидкости, рапределяемой по трубопроводу// Промислова гідраліка і пневматика – 2004. – №2(4). – С. 13-16.
20. Прохоров В.П. Исследование подачи огнетушащих порошков в автоматических установках пожаротушения. - Дисс. ... канд. техн. наук. - Москва, 1980. – 210 с.
21. Рекомендации по проектированию стационарных установок порошкового тушения для технологических помещений большой высоты. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. - 27 с.
22. Прохоров В.П. Исследование параметров истечения струй огнетушащих порошков. - В кн. Противопожарная защита зданий и сооружений. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1976. – С.125-129.
23. Прохоров В.П. Измерение скорости несущего потока и концентрации огнетушащего порошкового состава в двухкомпонентной струе. -В кн. Пожарная техника и тушение пожаров, вып. 14. - М.: ВНИИПО, 1977. – С.60-65.
24. Повзик Я.С., Панарин В.М. и др. Пожарная тактика. – М.: Высшая инженерная пожарнотехническая школа МВД СССР, 1987. – 480 с.
25. Ключ П.П., Палюх В.Г., Пустовой А.С. та ін. // Пожежна тактика. – Харків: Основа, 1998. – 592 с.
26. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
27. Кравчуновский В.Ф. Пожарные стволы – краткий анализ существующих устройств для распыления жидкости, перспективность использования гидроимпульсных систем // Пожежна безпека. Збірник наук. праць. – 2002. – С. 73-76.
28. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987.
29. Шавловский С.С. Основы динамики струй и разрушения горного массива. – М.: Наука, 1979. – 176 с.
30. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
31. Астарита Дж., Марручи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М.: Мир, 1978. – 309с.
32. Яхно О.М., Желяк В.І. Гідраліка ньютонівських рідин. – К.: Вища школа, 1995р. - 175с.
33. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидро-механика в инженерной практике. – К.: Техника, 1987. – 175с.
34. Литвинов В. Г. Движение нелинейновязкой жидкости. – М.: Наука, 1982. – 374с.
35. Эйрих Ф. Реология, теория и приложения. – М.: Изд-во ИЛ, 1969. – 822 с.

36. Яхно О.М., Матієга В.М., Ракович В.Я.
Технічна гідродинаміка та гідродинамічні решітки:
Посібник. – Чернівці: Зелена Буковина, 2002. -264
с.

Стаття надійшла 05.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленком О.Ф.