

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников, С.В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов/ С.В. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 640 с.: ил.
2. Вальдман, Э.К. Физиология машинного доения коров/ Э. К. Вальдман. – Л.: Колос, 1977. – 192 с.
3. Георгиевский, В.И. Физиология сельскохозяйственных животных/ В.И. Георгиевский. – М.: Агропромиздат, 1990. – 511 с.: ил.

4. Гейдрих, Д. Маститы сельскохозяйственных животных и борьба с ними/ Д. Гейдрих, В.Ренк. – М.: Колос, 1968. – 376 с.

5. Секреты высокой молочной продуктивности коров /авт. сост. С.Н. Александров. – М.: АСТ; Донецк: Сталкер, 2005. – 254 с.: ил.

6. Физиология функциональной системы лактации: теория и практика: монография/ Г.М. Марченко. – Кишинев, 1996. – 132 с.: ил.

7. Богданов, К.Ю. Физик в гостях у биолога/ К.Ю. Богданов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986. – 144 с.

УДК 536.24

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.10.2008

ГИДРОДИНАМИКА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ В СПРЕЙЕРНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ И ЩЕЛЕВЫМИ СОПЛАМИ

В.А. Немцев, докт. техн. наук, В.В. Воробьев, канд. техн. наук (ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси); Г.Ф. Бетенья, канд. техн. наук, доцент, П.А. Декевич, аспирант, Д.П. Литовчик, мл. научн. сотр. (УО БГАТУ)

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики истечения несжимаемой жидкости из цилиндрических и щелевых сопел в обоснование конструкции спрейера для быстрого охлаждения высоконагруженных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники. Исследовались условия распада струй и жидких пленок, устанавливались области и границы различных форм распада для определения наиболее оптимальных видов сопел.

Введение

Процесс объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) промышленных изделий широко используется в современных технологиях и дает возможность значительно увеличить экономическую эффективность производства как за счет повышения долговечности изделий, так и за счет экономии материалов и энергии [1]. При этом возможна замена легированных сталей углеродистыми или низкоуглеродистыми с соответствующим снижением стоимости материала.

Основная часть

Практически реализация процесса ОПЗ производится посредством нагрева деталей до закалочных температур и быстрого охлаждения потоками воды или струями различной интенсивности. К настоящему времени разработано несколько марок сталей для деталей различного назначения, упрочняемых методом ОПЗ. Это стали регламентированной и пониженной прокаливаемости (ПП).

При применении сталей ПП для изготовления высоконагруженных деталей для их закалки необходимо обеспечить величину скорости охлаждения изделия не менее 1500°С/с. Как показали экспериментальные ис-

следования, скорости охлаждения такого порядка достигаются в процессе охлаждения высокотемпературных поверхностей струями жидкостей [2, 3].

Конструирование охлаждающих устройств является одним из важнейших элементов технологии ОПЗ. В [4] предложена конструкция спрейера для быстрого охлаждения плоских деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники из сталей ПП с помощью жидких струй и пленок. В устройстве применяется механический метод распыливания, когда жидкость (вода) вытекает в неподвижную газовую среду (воздух). Для подачи охлаждающей воды на нагретую вертикальную поверхность плоского изделия используются простейшие и экономичные в изготовлении механические струйные форсунки, которые можно оборудовать соплами различной конструкции.

Необходимо отметить, что интенсивность процесса струйного охлаждения, а значит и скорость охлаждения детали, во многом определяют гидродинамические характеристики жидких струй и пленок, падающих на орошаемую поверхность. Эти параметры зависят от количества подаваемой жидкости, конструкции распыливающего устройства, а также от расстояния между срезом сопла и охлаждаемой поверхностью.

В зависимости от того, какая часть струи или пленки соприкасается с охлаждаемой поверхностью, можно осуществить процесс теплосъема как с помощью сплошных струй (или пленок), так и, применяя диспергированные струи (или пленки). Под термином «сплошная струя» следует понимать характеристику, которая указывает на отсутствие видимого распада струи (пленки) на отдельные капли. Механизм гидродинамики и теплообмена в этих двух случаях различен [2, 3].

Целью настоящего исследования являлось определение гидродинамических характеристик жидких струй и пленок при использовании в составе спрейерного устройства [4] механических форсунок с соплами следующей конструкции:

– одиночное отверстие в тонкой стенке цилиндрической формы;

– одиночное отверстие в тонкой стенке щелевидной прямоугольной формы.

Для проверки работоспособности спрейерного устройства, а также для определения его гидродинамических характеристик оно было включено в состав уста-

новки, разработанной для объемного термического модифицирования (ОТМ) плоских заготовок [5]. На данной установке исследовалась технология упрочнения с использованием печного нагрева заготовок и последующего охлаждения их водой в спрейерных устройствах. Принципиальная технологическая схема технологического модуля приведена на рис. 1.

В соответствии с приведенным вариантом ОТМ реализуются следующие параметры технологических режимов: давление в ресивере от 0,1 до 0,45 МПа; температура нагрева заготовок до 1173 К; продолжительность процесса охлаждения в спрейерном устройстве до 10 с; обеспечение заданной остаточной температуры заготовки до 473 К; обеспечение равномерного охлаждения поверхности заготовки; скорость охлаждения заготовки не менее критической для стали ПП; секундный расход охлаждающей среды не более 80 л/с.

Экспериментальная установка работала следующим образом. После открытия шарового вентиля 11 жидкость через пневмоклапан 12 по трубопроводу поступала в спрейер 4 и далее на охлаждаемый обра-

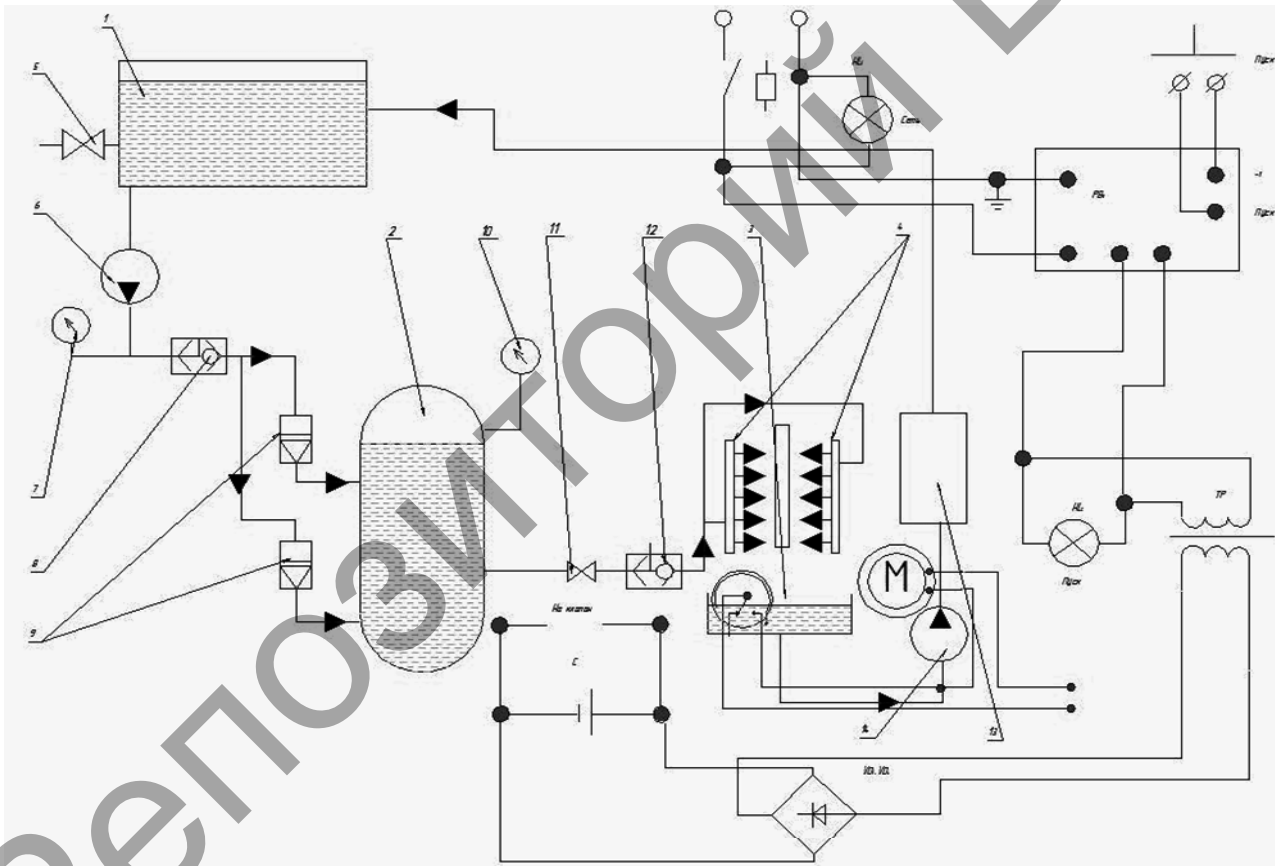


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема модуля для объемного термического модифицирования плоских заготовок:
1 – резервуар (5 м³); 2 – ресивер (0,8 м³); 3 – закалочная ванна;
4 – спрейеры; 5, 11 – кран шаровой фланцевый; 6 – насос бустерный;
7 – потенциометр; 8, 12 – пневмоклапан; 9 – регулятор давления;
10 – манометр МП-100; 13 – станция водоохлаждения;
14 – насос бустерный горизонтальный

зец. Жидкость собиралась в закалочной ванне 3 и затем подавалась насосом 14 в станцию водоохлаждения 13 и далее в емкость 1. Требуемое давление в ресивере 2 создавал насос 6. В процессе проведения испытаний производились измерения расхода охлаждающей жидкости (мл/с) и давления в ресивере.

По результатам гидродинамических испытаний для всех видов используемых в опытах сопел были определены фактические коэффициенты расхода. Эксперименты проводились при величине перепада давления жидкости на форсунке равном 0,35 МПа и температуре подаваемой воды равной +18 °С. Коэффициент расхода μ определялся как отношение измеренной в ходе опытов величины объемного расхода Q_3 к расчетной величине объемного расхода Q_T [6]:

$$\mu = Q_3 / Q_T$$

Расчетная величина объемного расхода определялась по зависимости:

$$Q_T = f \cdot V = f \cdot \left(\frac{2\Delta p}{\rho_1} \right)^{0,5}$$

где:

f – площадь поперечного сечения сопла, м²;

ρ_1 – плотность жидкости, кг/м³;

V – скорость струи (пленки) на срезе сопла, м/с;

Δp – перепад давления на сопле, Па.

Результаты обработки опытных данных представлены в таблице 1. Сопло №1 было выполнено в виде цилиндрического отверстия, сопла №№ 2-4 представля-

Таблица 1. Определение фактического коэффициента расхода охлаждающей жидкости

№ сопла	Диаметр сопла d , мм	Ширина сопла h_0 , мм	Длина сопла d_0 , мм	Площадь поперечного сечения сопла f , мм ²	Отношение длины сопла к ширине d_0/h_0	Расчетный расход воды Q_T , мл/с	Измеренный расход воды Q_3 , мл/с	Коэффициент расхода μ
1	1,5	-	-	1,77	-	46,4	28,8	0,62
2	-	0,5	2,0	1,0	4,0	26,2	21,0	0,8
3	-	1,0	1,0	1,0	1,0	26,2	21,0	0,8
4	-	0,67	1,5	1,0	2,24	26,2	22,0	0,84

ли собой щелевидные прямоугольные отверстия.

Из анализа представленных в таблице 1 данных видно, что наиболее эффективными, с точки зрения использования расхода охлаждающей жидкости, представляются сопла, выполненные в виде плоских прямоугольных щелей (№№ 2-4). Коэффициент расхода для них изменяется в пределах от 0,8 до 0,84, в то время как для цилиндрического сопла он равен 0,62.

В работе [6] показано, что для струйных форсунок можно достичь более высоких значений коэффициента расхода (до 0,87) посредством профилирования цилиндрического сопла, создания конических сопел и т.д. Однако все это приводит к удорожанию конструкции распыливающего устройства, особенно тогда, когда необходимо обеспечить равномерное распределение потока охлаждающей жидкости по всей орошаемой поверхности нагретого изделия. В этом случае количество отверстий в стенке водопадающего коллектора может достигать тысячи и более штук [3].

Полученные опытные данные по гидродинамике для щелевых сопел №№ 2-4 хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований [7,8], где было установлено, что для плоской прямоугольной щели коэффициент расхода зависит только от величины отношения длины сопла d_0 к его ширине h_0 . Причем оптимальным является диапазон: $1,7 \leq d_0/h_0 \leq 2,4$. В этом случае коэффициент расхода щелевого сопла находится в пределах: $0,81 \leq \mu \leq 0,85$. Показано, что использовать щелевые сопла с соотношением геометрических характеристик $d_0/h_0 < 1,7$ или $d_0/h_0 > 2,4$ нецелесообразно, т.к. в этом случае величина коэффициента расхода снижается.

Как отмечалось выше, помимо расходной характеристики сопла, важным гидродинамическим параметром является длина нераспавшейся части струи (пленки). Зная величину этого параметра можно орошать нагретую поверхность детали либо сплошными струями (пленкой), либо посредством системы капель жидкости. В результате, изменяя расстояние от поверхности охлаждаемого объекта до среза сопла, можно регулировать интенсивность теплосъема с орошаемой поверхности, добиваясь необходимой величины скорости охлаждения изделия. Необходимо отметить, что гидродинамические характеристики жидких струй и пленок, вытекающих из сопел, являются исходными данными для последующего решения задачи теплообмена.

При вытекании жидкости из щелевидного сопла (сопла №№ 2-4) образуется веерообразная пленка, плоская с двух сторон. Распад пленки происходит вследствие перфорации ее поверхности отверстиями, вплоть до появления тонких нитей, распадающихся на отдельные капли [7,8]. Для определения длины (радиуса) нераспавшейся части жидкой пленки, вытекающей из плоской щели, используется следующая критерияльная зависимость [8]:

$$L = 18 \cdot M^{-1} \cdot \left(\frac{W_1}{L} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{W_1}{L} + 1 \right) \cdot \left(\frac{W_1}{L} - 1 \right)^{-2}, \quad (1)$$

где $M = \rho_2 / \rho_1$ – критерий, учитывающий инерционные свойства газовой среды и жидкости;

ρ_2, ρ_1 – плотности воздушной и водяной сред, кг/м³;

$L = r^2 / K$ – безразмерная длина пленки;

r – радиус нераспавшейся части пленки, м;

K – эмпирический параметр, зависящий от отношения d_0/h_0 , [7], м²;

$W_1 = \rho_1 V^2 K^{0,5} \sigma^{-1}$ – критерий Вебера;

σ – величина поверхностного натяжения, Н/м;

$V = \mu (2 \Delta p / \rho_1)^{0,5}$ – скорость пленки на срезе сопла, м/с;

μ – коэффициент расхода сопла;

Δp – перепад давления на сопле, Па.

Определение величины радиуса r нераспавшейся части пленки выполнялось для сопла № 4 (табл. 1), т.

к. зависимость (1) справедлива для щелевых сопел с соотношением геометрических характеристик, находящихся в пределах: $1,7 \leq d_0/h_0 \leq 2,4$ (оптимальный диапазон). В нашем случае для сопла № 4 имеем: $d_0/h_0 = 2,24$. Тогда, согласно данным [7], величина безразмерного коэффициента $K = 13 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, а коэффициент расхода равен $\mu = 0,85$.

Расчет производился для следующего диапазона изменения перепада давления: $\Delta p = (0,5 \div 10) \cdot 10^5$, Па. Теплофизические характеристики воды и воздуха были взяты при температуре сред равной $+ 18 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда величина критерия $M=1,21 \cdot 10^{-3} < 1,3 \cdot 10^{-3}$, что позволило использовать зависимость (1).

Уравнение (1) было преобразовано к следующему виду:

$$BY^2 = 14876 \cdot \left(\frac{AX}{Y^2}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{AX}{Y^2} + 1\right) \cdot \left(\frac{AX}{Y^2} - 1\right)^{-2},$$

где $A = 2 \mu^2 K^{1,5} \sigma^{-1}$; $B = K^{-1}$.

Решение производилось итерационным методом. При этом диапазон изменения задаваемых (Δp) и искоемых (r) величин был принят следующим:

$$X = \Delta p = (0,1 \div 10) \cdot 10^5, \text{ Па};$$

$$Y = r = (0,1 \div 200) \cdot 10^{-3}, \text{ м}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2. Определение радиуса нераспавшейся части пленки

Перепад давления $\Delta p \cdot 10^{-5}$, Па	0,5	1,0	2,0	3,5	5,0	8,0	10,0
Радиус нераскрывшейся части пленки r , мм	24	26	33	40	42	50	54
Скорость пленки на срезе сопла V , м/с	8,5	12	17	23	27	34	38

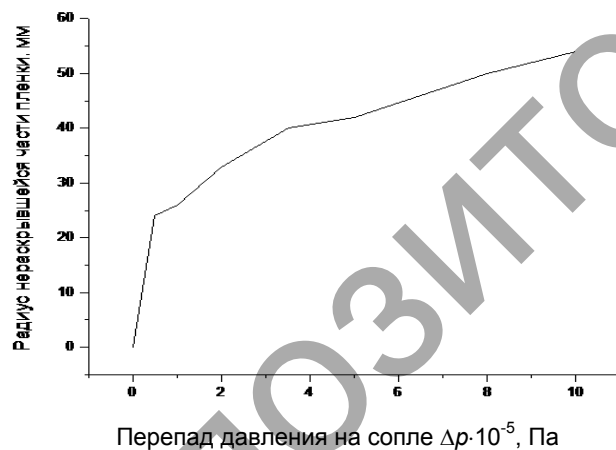


Рисунок 2. Зависимость величины радиуса нераскрывшейся части пленки от величины перепада давления на плоском сопле

Из анализа полученных результатов видно, что на начальном этапе в диапазоне величин перепада давления от 0 до $0,5 \text{ кгс/см}^2$ происходит быстрый рост длины жидкой пленки. В дальнейшем наблюдается плавное возрастание величины радиуса нераскрывшейся части пленки по мере роста перепада давления воды на форсунке.

Выводы

На основе выполненных исследований гидродинамических характеристик спрейерного устройства можно сделать следующие выводы.

В практически важном для работы спрейерного устройства диапазоне изменения перепада давления на форсунке ($0,2-0,4 \text{ МПа}$) опытным путем определены коэффициенты расхода для сопел цилиндрической и щелевидной форм. Показано, что наиболее оптимальными являются расходные характеристики плоского щелевидного сопла, отношение длины которого к его ширине находится в пределах $1,7-2,4$. В этом случае коэффициент расхода сопла находится в пределах $0,81-0,85$.

В широком диапазоне изменения перепада давления на плоском щелевидном сопле была рассчитана длина нераспавшейся части жидкой пленки, что позволило определить границы орошения охлаждаемой поверхности детали посредством сплошной пленки.

Результаты проведенных гидродинамических исследований были использованы при разработке и создании высокопроизводительного устройства для закалки деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленков, С.Б. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3т./ С.Б. Масленков, А.И.Ляпунов, В.М. Зинченко, Б.К. Ушаков. – М.: Наука и технологии, 2003. – Т. 1. – 392 с.
2. Динер, А. Обзор литературы по теплоотдаче при струйном охлаждении/ А. Динер// Черные металлы, 1976, № 4. – С. 26-29.
3. Исаченко, В.П. Струйное охлаждение/ В.П. Исаченко, В.И. Кушнырев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216с.
4. Спрейер для быстрого охлаждения плоских деталей: пат. 2208 Респ. Беларусь, С21D1/62/ Г.Ф. Бетенья, Д.П. Литовчик и др.; заявитель Белорус. гос. аграрн. технич. ун-т. – № и 20050048; заявл. 07.02.05; опубл. 30.09.05 // Офиц. бюл./ Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2005.
5. Технологический модуль для закалки деталей: пат. 2139 Респ. Беларусь, С21D1/00/ Г.Ф. Бетенья, Д.П. Литовчик и др.; заявитель Белорус. гос. аграрн. технич. ун-т. – № и 20040601; заявл. 17.12.04; опубл. 30.09.05 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2005.
6. Дитякин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей/ Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
7. Clark, C.L. The dynamics of the rim of an spray sheets/ C.L. Clark, N. Dombrowski //Chemical Engineering Science, 1971. – Vol. 26. – P. 1949-1952.
8. Dombrowski, N. The effect of ambient density on drop formation in sprays/ N. Dombrowski, P. Hooper //Chemical Engineering Science, 1962. –Vol. 17. – P. 291-305.