

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ГРАДИРЕН

*Проведено експериментальні дослідження закономірностей витікання рідини з відцентрових форсунок великого розміру, що використовуються у градирнях. Вивчено деякі геометричні характеристики конусоподібного факела рідини, що витікає з форсунки. Отримано узагальнюючу формулу для кута розкриття факела рідини, що розпилюється.*

*Проведены экспериментальные исследования закономерностей истечения жидкости из центробежных форсунок большого размера, используемых в градирнях. Изучены некоторые геометрические характеристики конусообразного факела жидкости, истекающей из форсунки. Получена обобщающая формула для угла раскрытия факела распыливающейся жидкости.*

Охлаждение технической воды в системах оборотного водоснабжения, сопровождающее многочисленные технологические процессы, широко применяется в энергетике и различных отраслях промышленности. В качестве охлаждающих установок в основном используются градирни [1, 2]. Актуальные задачи снижения энергопотребления и повышения эффективности охлаждения оборотной воды вынуждают искать новые решения при разработке и модернизации промышленных установок испарительно-охлаждения. В предыдущей работе авторов [3] описано энергоэффективное устройство для распыливания воды центробежными форсунками низкого давления, предназначенное для использования в градирнях нового типа. Принцип работы таких градирен основан на организации многократно соударяющихся встречных конусообразных потоков распыленной воды, что приводит к образованию мелкодисперсного облака капель. При этом заметно интенсифицируются теплообменные процессы. Аппараты на основе таких распылителей обладают целым рядом других положительных технико-экономических показателей. Однако гидродинамика формирования подобного облака капель и влияние на этот процесс различных факторов изучены недостаточно. Это является преградой для разработки методов расчета градирен нового типа, оптимизации их конструкции и широкого внедрения в промышленность.

С целью исследования закономерностей истечения жидкости из центробежных форсунок, а

также изучения геометрических характеристик конусообразного факела распыла при различных гидродинамических условиях истечения был построен экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 1.

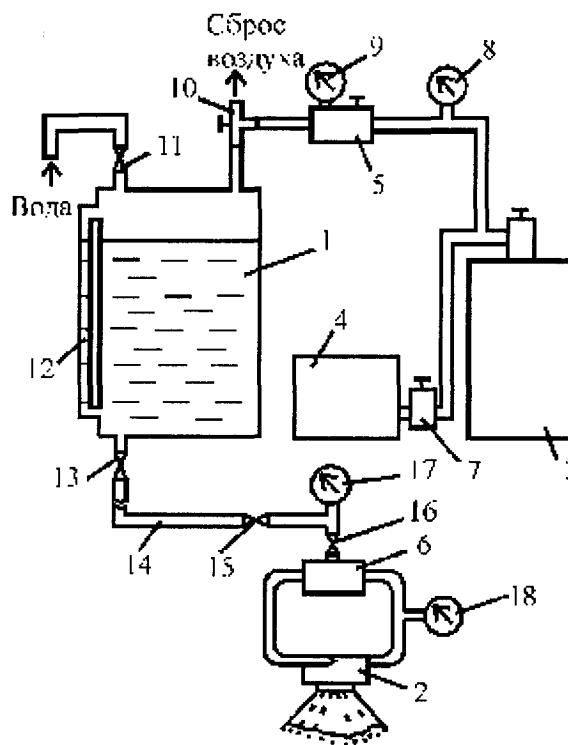


Рис. 1

Стенд включал в себя напорный бак 1 емкостью 160 литров, расположенный на высоте 4 м над опытной форсункой 2, ресивер 3, компрессор 4, воздушный редуктор 5, коллектор 6, а также трубопроводную арматуру и контрольно-изме-

рительные приборы. Воздух от компрессора 4 через регулируемый предохранительный клапан 7 поступал в ресивер 3. Давление в ресивере контролировалось манометром 8. При превышении некоторого установленного давления в ресивере излишки нагнетаемого компрессором воздуха стравливались предохранительным клапаном 7. Редуктор 5 позволял регулировать и поддерживать неизменным избыточное давление воздуха в напорном баке 1 в процессе истечения из него воды. За счет этого поддерживался практически неизменный расход воды через исследуемую форсунку 2 вне зависимости от уровня жидкости в напорном баке. Давление в напорном баке контролировалось манометром 9. Через вентиль 10 сжатый воздух подавался в напорный бак либо сбрасывался из него при заполнении бака водой. Наполнение бака осуществлялось через вентиль 11 от водопроводной магистрали. Уровень воды в баке контролировался при помощи мерного стекла 12. В опытах вода через запорный вентиль 13, трубопровод 14, вентиль 15, регулирующий расход воды, и шаровой запорный вентиль 16 поступала на распределительный коллектор 6. Конструкция коллектора позволяла подключать к нему до трех центробежных форсунок 2 с двумя тангенциальными входными патрубками и обеспечивала равномерное распределение воды между исследуемыми форсунками. Манометр 17 позволял измерять рабочее давление воды перед коллектором при перекрытой магистрали. Манометр 18 использовался для измерения давления воды непосредственно перед опытной форсункой в процессе истечения из нее жидкости.

Поскольку в реальных производственных процессах расход воды через форсунку достигает  $15 \text{ м}^3/\text{час}$  и более (что трудно осуществить в лабораторных условиях), экспериментальные исследования проводились при пониженных расходах воды с выполнением гидродинамического и геометрического подобия.

Для исследований были изготовлены центробежные форсунки с двумя тангенциальными входными патрубками (рис. 2). Опыты проводились с форсунками трех типоразмеров, диаметр  $D_k$  камеры закручивания которых составлял 46, 55 и 72 мм. В экспериментах диаметр выходного отверстия форсунки (диаметр сопла  $d_c$ ) для каждого типоразмера мог меняться. При этом отношение диаметра камеры к диаметру сопла составляли 4; 3,2; 2,4 и 1,5.

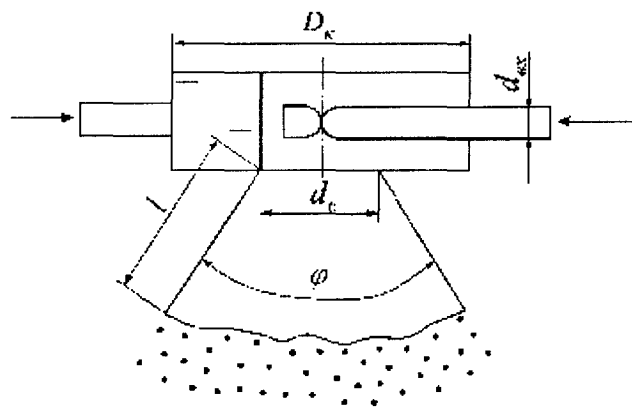


Рис. 2

На первом этапе исследований закономерностей истечения жидкости из центробежной форсунки измерялся угол  $\varphi$  раскрытия факела (конуса) распыливаемой жидкости с помощью специального приспособления. Поскольку в градирнях нового типа центробежные форсунки расположены вдоль вертикальной оси так, что их факелы распыливания направлены навстречу друг другу, в опытах были исследованы форсунки с различной ориентацией в пространстве. Одни форсунки располагались на стенде таким образом, что ось факела была направлена вертикально вниз (верхняя форсунка), у других форсунок истечение происходило вертикально вверх (нижняя форсунка).

Эволюция поведения воды, истекающей из сопла центробежной верхней форсунки, выглядела следующим образом. Вначале, при малом расходе формировался характерный пленочный колокол, нижняя кромка которого сужалась вдоль потока. С увеличением подачи жидкости колокол постепенно раскрывался в конусообразную поверхность. Дальнейшее повышение расхода воды приводило к увеличению угла  $\varphi$ . При наблюдении за истечением жидкости в стробоскопическом (импульсном) освещении было обнаружено следующее. При малых расходах жидкости коническая поверхность пленки оставалась достаточно гладкой. При достижении некоторого расхода на поверхности конусообразной пленки начинала формироваться волнообразная ступенчатая поверхность. Например, на одном из режимов при длине образующей конуса  $l \sim 190 \text{ мм}$ , высота ступеньки составляла порядка 20 мм. При дальнейших увеличениях расхода волнообразная структура поверхности конуса сохранялась.

Наблюдения в стробоскопическом освещении позволили составить более детальную картину процесса истечения жидкости, которую нельзя

получить в непрерывном освещении. Так, на поверхности колокола и конуса были обнаружены хаотически возникающие кругообразные каверны (разрывы пленки).

Эволюция образования конусообразного факела у нижней форсунки при малых и умеренных расходах несколько отличалась от верхней форсунки за счет действия гравитационных сил. На малых расходах форма факела распыливания напоминала раскрывшийся тюльпан. С увеличением расхода изогнутая поверхность истекающей жидкости постепенно выпрямлялась, приближаясь к правильной форме конуса. При этом формирование конусообразной пленки и ее разрыв на капли у нижней и верхней форсунок отличались мало. Наблюдались те же локальные разрывы на пленке и образование ступенек на поверхности конуса с увеличением расхода.

Описанная качественная картина процесса распыливания жидкости из центробежных форсунок практически не изменялась при различных диаметрах сопел.

Расход воды через форсунку определялся с помощью тарировок с использованием мерной емкости.

Измерения угла  $\varphi$  производились, начиная с минимальных расходов, при которых из колокола формировалась правильная коническая поверхность, до максимально достижимых на экспериментальном стенде.

В опытах диапазон давлений перед распределительным коллектором при работающих форсунках составлял от 0,075 до 1,82 атм. При этом расход  $Q$  жидкости через центробежные форсунки изменялся в пределах 0,09...1,38 л/с (0,0014...5 м<sup>3</sup>/час).

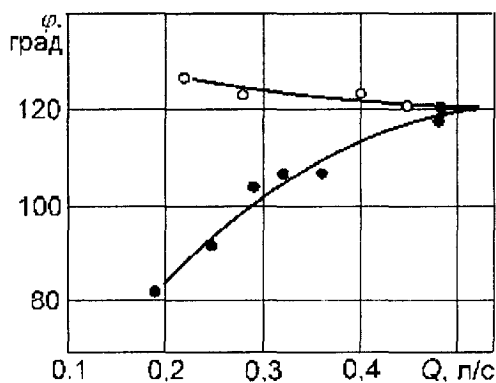


Рис. 3

На рис. 3 в качестве примера показаны зависимости изменения угла  $\varphi$  раскрытия факела распыливаемой жидкости от расхода  $Q$  воды для верхней и нижней форсунок с одинаковыми геометрическими параметрами ( $D_k = 72$  мм,  $d_c = 30$  мм). Формирование конуса правильной фор-

мы завершалось для форсунок с различной ориентацией при углах  $\varphi \sim 80^\circ$  – для верхней, и  $\varphi \sim 130^\circ$  – для нижней форсунки. Поэтому измерения начинали после достижения этих значений углов. У верхних форсунок с увеличением расхода угол  $\varphi$  увеличивался для всех размеров выходного сопла  $d_c$  (нижняя кривая). В то же время у нижних форсунок, особенно при больших диаметрах сопел, наблюдалось некоторое уменьшение угла раскрытия с увеличением расхода (верхняя кривая). Заметим, что диапазон изменения углов  $\varphi$  от расхода у нижних форсунок значительно уже, чем у верхних. При достижении достаточно больших расходов кривые  $\varphi = f(Q)$  совпадают, так как гравитационные силы начинают оказывать на форму факела значительно меньшее влияние, чем силы инерции. Поэтому характер истечения становится независимым от пространственного расположения форсунок. В дальнейшем эксперименты проводились с форсунками, факел распыливания которых был направлен вертикально вниз.

Было проведено свыше 150 опытов при различных гидродинамических режимах и с различными геометрическими параметрами форсунок (12 вариантов). В результате получен достаточно большой статистический материал, позволивший обобщить опытные данные. Обработка экспериментальных исследований проводилась на персональном компьютере с использованием вычислительных прикладных программ (Curve Expert, Advanced Grapher).

На рис. 4 в качестве примера приведены опытные зависимости угла  $\varphi$  раскрытия факела

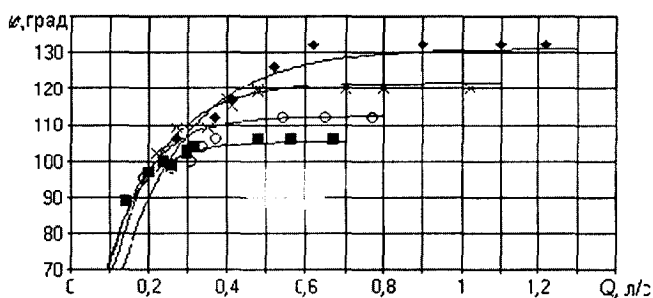


Рис. 4

от расхода  $Q$  жидкости для центробежных форсунок с  $D_k$  равным 55 мм и отношением  $D_k/d_c$ : ♦ – 1,49; x – 2,37; o – 3,24 и • – 3,93. Аналогичные зависимости были получены для форсунок с  $D_k$  равным 46 мм и 72 мм. С ростом расхода значения угла  $\varphi$  вначале увеличиваются, а затем достигают своего максимального значения. Иными словами, дальнейшее увеличение расхода жид-

кости из сопла форсунки не приводит к росту угла раскрытия факела. Для одного и того же расхода у форсунок с меньшим диаметром сопла наблюдался меньший угол раскрытия факела. Опыты показали, что на форсунках с различными диаметрами камеры закручивания, но с одинаковым отношением диаметра камеры к диаметру сопла достигается один и тот же максимальный угол раскрытия факела  $\varphi_{\max}$ .

На рис. 5 показана зависимость  $\varphi_{\max}$  от отношения  $D_k/d_c$ . Угол раскрытия факела линейно уменьшается с увеличением  $D_k/d_c$ .

В результате обработки опытных данных по-

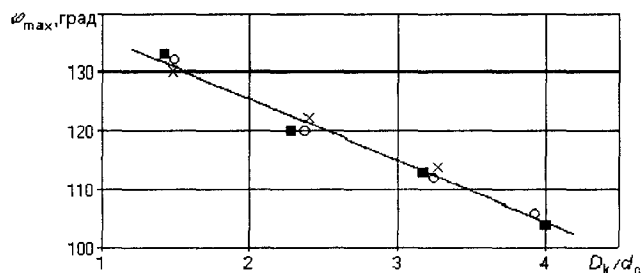


Рис. 5

лучена эмпирическая формула для максимального угла раскрытия факела жидкости

$$\varphi_{\max} = 146,5 - 10,5 D_k/d_c. \quad (1)$$

Анализ полученных результатов позволил найти зависимость для минимального расхода  $Q_{\min}$  через форсунку, выше которого угол раскрытия факела достигает своего максимального значения  $\varphi_{\max}$  и становится автомодельным по отношению к расходу

$$Q_{\min} = (0,83 - 0,12 D_k/d_c), \text{ л/с.} \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) справедливы при  $1,42 \leq D_k/d_c \leq 4$ .

С целью практического использования полученных результатов обобщающая зависимость искалась в терминах  $\varphi = f(Re_{\text{вх}}, D_k/d_c)$ , где число Рейнольдса  $Re_{\text{вх}} = V_{\text{вх}} d_{\text{вх}}/\nu$ . Здесь  $V_{\text{вх}}$  – скорость жидкости во входном патрубке форсунки,  $d_{\text{вх}}$  – диаметр входного патрубка,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости (для воды  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Число Рейнольдса может быть найдено из очевидного соотношения

$$Re_{\text{вх}} = 4 Q / (\pi d_{\text{вх}} \nu n),$$

где  $n$  – число подводящих входных патрубков.

На рис. 6 показана полученная из экспериментов зависимость угла раскрытия  $\varphi$  факела жидкости от числа Рейнольдса  $Re_{\text{вх}}$ . Экспериментальные точки сгруппированы по отношению диаметра камеры закручивания форсунки к диаметру сопла ( $D_k/d_c$ : ■ – 1,5; × – 2,4; о – 3,2 и ♦ – 4).

Обработка опытных данных привела к аппроксимации

$$\varphi = (146,5 - 10,5 D_k/d_c) \times [1 - \exp((-2,78 - 4,12 D_k/d_c) 10^{-5} Re_{\text{вх}})], \quad (3)$$

при  $1,42 \leq D_k/d_c \leq 4$ ;  $7000 \leq Re_{\text{вх}} \leq 80000$ .

Кривые на рис. 6 построены по формуле (3).

Не менее важным параметром для расчета и проектирования подобных распылительных устройств является, в частности, длина нераспавшейся пленки факела распыла. Эти данные авторы намерены привести в следующей статье.

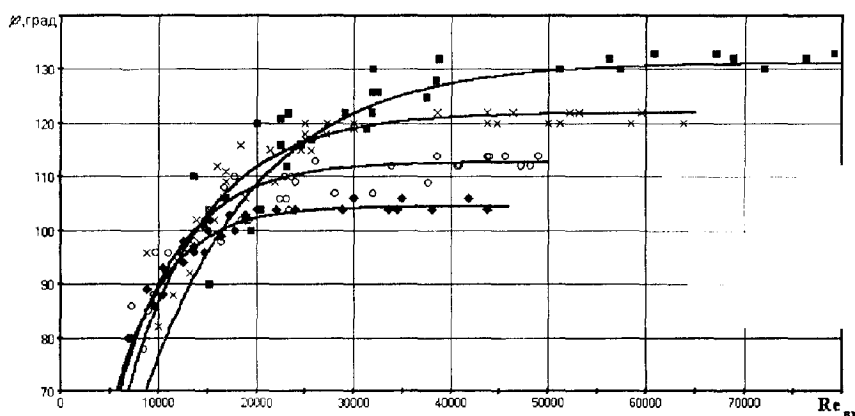


Рис. 6

1. А. Фраас, М. Оцисик. Расчет и конструирование теплообменников. - М.: Атомиздат, 1971. - 358 с.
2. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / Под ред. О.Т. Ильченко. - Харьков: В.ш. Изд-во при Харьк. ун-те. - 1985. - 384 с.
3. А.М. Подвысоцкий, В.В. Дубровский, С.Е. Кидалюк, М.В. Довгопол. Энергоэффективное устройство для распыливания воды центробежными форсунками низкого давления / Проблемы загальної енергетики. - 2001. - №4. - С. 54-57.