

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДИАБАТИЧЕСКИХ КАМЕР ОРОШЕНИЯ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК СРЕДСТВО ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Сибгатуллин Н.Ф.<sup>1</sup>, Сафиуллин Р.Г.<sup>1</sup>, Ахмерова Г.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, e-mail: akhmerovaag@mail.ru

---

**Аннотация.** При рассмотрении практико-ориентированного обучения как средства организации подготовки студентов анализируется изготовленный и смонтированный в лаборатории КГАСУ стенд для исследования эффективности адиабатических камер орошения разных конструкций. Его можно использовать при обучении бакалавров по профилям подготовки «Инженерные системы жизнеобеспечения в строительстве зданий» (направление подготовки 08.03.01 Строительство), «Строительство и эксплуатация объектов теплоэнергетики и теплотехники» (направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника), а также при проведении НИР. При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» обучающийся может использовать свои теоретические знания для практического применения в реальных инженерных системах, ознакомиться с особенностями работы камеры орошения в холодный и теплый периоды года и проводить экспериментальные исследования по оценке эффективности распылителей воды для увлажнения воздушного потока. В статье рассматриваются варианты использования стенда для проведения экспериментальных исследований, направленных на оценку эффективности камер орошения с различными типами распылителей: форсунки или пористые вращающиеся распылители – и сравнительного анализа способов образования межфазной поверхности. Делается вывод о том, что использование созданного лабораторного стенда в образовательном процессе способствует приобретению прикладных знаний, организации самостоятельной исследовательской деятельности, повышению качества подготовки студентов.

---

Ключевые слова: камера орошения, увлажнение воздуха, практико-ориентированный подход.

## **USE OF LABORATORY BENCH FOR STUDY OF EFFICIENCY OF ADIABATIC SPRAY CHAMBERS OF DIFFERENT DESIGNS AS A MEANS PRACTICE-ORIENTED TRAINING**

**Sibgatullin N.F.<sup>1</sup>, Safiullin R.G.<sup>1</sup>, Akhmerova G.M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, e-mail: akhmerovaag@mail.ru

---

**Annotation.** A stand manufactured and installed in the KGASU laboratory for studying the effectiveness of adiabatic spray chambers of different structures can be used in the educational process to train bachelors in the training profiles «Engineering life support systems in building construction» (the direction of preparation of the 08.03.01 Construction), «Construction and operation of heat power and heat engineering facilities» (the direction of preparation of the 13.03.01 Heat power and heat engineering), and also when conducting research work. When carrying out laboratory work in the discipline «Air conditioning and cold supply», the student can use his theoretical knowledge for practical application in real engineering systems. Students have the opportunity to familiarize themselves with the features of the spray chamber during the cold and warm periods of the year and gain experience in practical work on a modern installation. Description is given of the design and operation of a laboratory bench for heat and moisture treatment of air, on which experimental studies can be carried out to assess the effectiveness of water sprayers for humidifying air flow and comparative analysis of interfacial surface formation methods. The study considers options for using a bench for experimental studies aimed at evaluating the effectiveness of spray chambers with various types of sprayers: hydraulic nozzles or porous rotating atomizers. It is concluded that the use of the created laboratory stand in the educational process contributes to the acquisition of applied knowledge, the organization of independent research activities, and improving the quality of student training.

---

Keywords: spray chamber, humidification of air, practice-oriented approach.

Согласно исследованиям [1], все более актуальной становится задача по формированию у обучающихся навыков, позволяющих им использовать теоретические знания в реальных

инженерных системах. В последние годы нехватка оборудования для проведения лабораторных экспериментов была серьезной проблемой в высшем образовании. Анализ концепции реализации современного лабораторного практикума в педагогической литературе [2, 3, 4] показал актуальность использования практико-ориентированного подхода. Так, в курсе «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» студенты КГАСУ по профилям подготовки «Инженерные системы жизнеобеспечения в строительстве зданий» (направление подготовки 08.03.01 Строительство), «Строительство и эксплуатация объектов теплоэнергетики и теплотехники» (направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника) проводят исследования эффективности проектных решений обработки воздуха на действующем центральном кондиционере с рециркуляцией воздуха, где в зависимости от конкретных условий требуемого теплообмена используется комбинация фреонового воздухоохладителя и модуля сотового увлажнителя с орошаемым слоем [5, 6].

У студентов КГАСУ также есть возможность проводить комплекс занятий с «контактным теплообменным модулем» приточной установки, где в качестве основного блока выступает камера орошения. На действующей установке студентам можно показать, что форсуночные камеры орошения энергетически более эффективны в плане получения максимальной поверхности непосредственного контакта капель воды и воздуха при наименьшем аэродинамическом сопротивлении самой камеры [7, 8, 9]. Кроме того, имеется возможность наглядно показать универсальность камер орошения, так как в них могут проводиться как изоэнтальпические (адиабатические), так и политропические процессы. Например, в теплый период года в камере орошения воздух охлаждается и осушается за счет использования холодной воды с температурой ниже температуры точки росы воздуха. В холодный период в камере орошения воздух увлажняется в изоэнтальпическом режиме при распыливании оборотной воды, имеющей температуру мокрого термометра воздуха.

На теоретических занятиях в первую очередь студентов знакомят с изоэнтальпическим режимом камеры орошения распылительного типа. Указывается, что для оценки КПД при работе в этом режиме используют коэффициент адиабатической эффективности  $E_a$ , отражающий отношение в процессе температур воздуха по сухому термометру  $t_1$  и  $t_2$  соответственно на входе в камеру орошения и на выходе из нее – к температуре воздуха по мокрому термометру  $t_{m1}$

$$E_a = 1 - \left( \frac{t_2 - t_{m1}}{t_1 - t_{m1}} \right).$$

Фактически коэффициент  $E_a$  характеризует степень завершенности процесса изоэнтальпического увлажнения воздуха (с охлаждением) в контактной зоне аппарата. При этом коэффициент эффективности  $E_a$  зависит от массовой скорости воздуха и коэффициента

орошения  $B$ . Коэффициент орошения  $B$  определяется как отношение массового расхода воды к массовому расходу воздуха.

Особое внимание студентов обращается на то, что для достижения эффективной обработки воздуха в крупных адиабатических камерах орошения рекомендуется использовать незасоряемые высокопроизводительные форсунки с большим диаметром выходного отверстия. Широкофакельные тангенциальные форсунки обладают такими характеристиками [10], они имеют диаметр сопла 5–7 мм и создают сплошной плоский капельный факел с углом конусности более 160 градусов. Однако из-за высокой полидисперсности факела распыла в объеме камеры орошения с такими форсунками испаряются только мелкие капли размером до 20–50 мкм, что составляет лишь 20–30% от общего расхода воды на распыление. Крупные же капли не успевают испариться, собираются в поддоне камеры для повторного распыления. Поэтому в крупных адиабатических камерах необходима интенсивная циркуляция воды, чтобы обеспечить достаточный коэффициент орошения, который может достигать значений  $B = 2$  и более.

Вместо широкофакельных форсунок в распылительных камерах компактных приточных установок, работающих в адиабатическом режиме, нужно использовать мелкодисперсные гидравлические форсунки низкого давления [11]. Факел распыла у них более однородный, с существенным преобладанием быстро испаряющихся мелких капель, что важно для целей увлажнения воздуха. При этом не требуются большие значения коэффициента орошения  $B$ . Форсунки такого типа из-за большой дальности факела при угле конусности 60–70° устанавливаются на верхней стенке камеры либо в выходном сечении камеры с распылом навстречу воздуху.

Наиболее эффективны для применения в камерах орошения пористые вращающиеся распылители (ПВР), создающие практически монодисперсный факел распыла. Конструкция и схема работы ПВР показаны на рисунке 1.

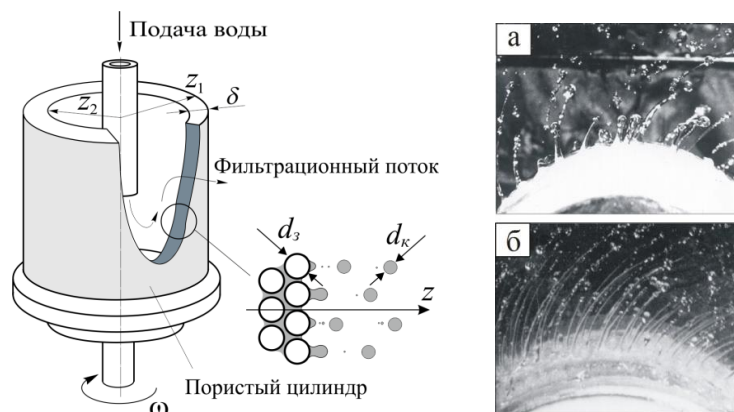


Рис. 1. Схема ПВР и режимы каплеобразования: а – капельный; б – струйный;

$\omega$  – угловая скорость вращения;  $d_k$  – диаметр капель;  $d_z$  – диаметр зерна пористого материала ПВР

Распылитель в виде полого цилиндра, имеющего толщину стенки  $\delta$ , выполнен из пористого материала, который получен методом спекания из одноразмерных зерен  $d_z$ . При вращении с угловой скоростью  $\omega$  во внутреннюю полость распылителя подается вода, которая под действием центробежной силы фильтруется сквозь пористую стенку и в виде капель и струй диаметром  $d_k$  сбрасывается с зерен на его внешней поверхности. Так как зерна близки по геометрии и размерам, то и капли получаются практически одноразмерными. При окружных скоростях вращения свыше 20 м/с отношение диаметров наиболее крупных капель к самым мелким в распыле составляет  $d_k^{\max} / d_k^{\min} < 2$ . У ПВР с размером зерен материала  $d_z \leq 50$  мкм формируется равномерный факел распыла с каплями диаметром  $d_k \sim 20$ –30 мкм. Все эти характеристики ПВР позволяют управлять дисперсностью за счет скорости вращения и максимально интенсифицировать процесс увлажнения в адиабатических аппаратах, таких как камера орошения.

Студенту необходимо знать описанные выше характеристики разных типов распылителей для правильного расчета и конструирования камер орошения приточных установок вентиляции и кондиционирования воздуха. Особенно важно дать ему возможность проводить самостоятельные экспериментальные исследования по определению влияния дисперсности факела распыла и геометрии расположения распылителей на эффективность управляемых тепломассообменных процессов при обработке воздуха.

### **Цель исследования**

Целями данной работы являются определение возможности использования в учебном процессе лабораторного стенда для экспериментальной оценки эффективности тепломассообменных процессов и разработка содержания практико-ориентированного лабораторного практикума по дисциплине «Кондиционирование и холодоснабжение», в котором студенты получают возможность определять эффективность камер орошения с диспергаторами разных типов: с широкофакельными и гидравлическими форсунками низкого давления, пористыми вращающимися распылителями. Характеристики тепломассообмена между воздухом и каплями воды предлагается изучать на лабораторном стенде с изменяемой схемой расположения распылителей. Конструкция камеры орошения позволяет исследовать целый ряд управляемых процессов обработки воздуха благодаря многорядной установке распылителей и наличию системы регулирующих клапанов на линии питания, позволяющих в широком диапазоне управлять расходом и дисперсностью распыляемой воды.

Таким образом, посредством использования прикладного характера лабораторного практикума предлагается практико-ориентированный подход при применении специализированного лабораторного стенда.

### Материал и методы исследования

Для имитации основных процессов тепломассообмена используется лабораторный стенд, схема которого показана на рисунке 2. Стенд содержит узел забора воздуха из помещения с клапаном 1, электрический воздухонагреватель 2, вентилятор 3, камеру орошения 4 с поддоном 5. Перед камерой орошения 4 смонтирован воздухораспределитель 6 для выравнивания воздушного потока после вентилятора. Отделение неиспарившихся капель воды производится в каплеуловителе 7, установленном на выходе из камеры орошения. Он защищает от проникновения мельчайших капель в приточный воздуховод 8. Измерение количества воздуха производится в контроллере 10. Расход воды на распыление  $W$  варьируется включением разного количества распылителей 9 и устанавливается с помощью ротаметра 12, тарированного объемным методом.

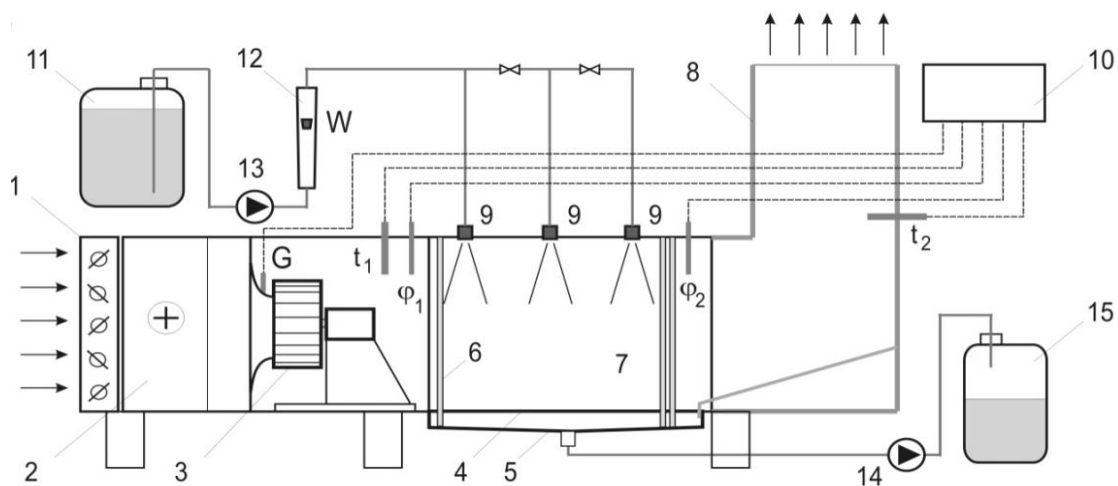


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для испытаний эффективности тепломассообменных процессов в камере орошения (вариант с гидравлическими форсунками низкого давления)

Вода из мерной емкости 11 насосом 13 подается к распылителям 9. Насос 14 удаляет воду из поддона 5 в мерную емкость 15. Количество обрабатываемого воздуха  $G$ , его температура  $t_1$  и относительная влажность  $\phi_1$  на входе в оросительную камеру, а также температура за камерой (в воздуховоде)  $t_2$  регистрируются в контроллере 10. Расход воды на распыление  $W$  варьируется включением разного количества распылителей  $n$  и устанавливается с помощью ротаметра 12, тарированного объемным методом.

В зависимости от способов образования межфазной поверхности и исследуемой распылительной системы на съемной крышке камеры могут быть смонтированы различные типы распылителей, указанные выше. Так, конструкция лабораторного стенда дает возможность испытать несколько систем распыления (рис. 3):

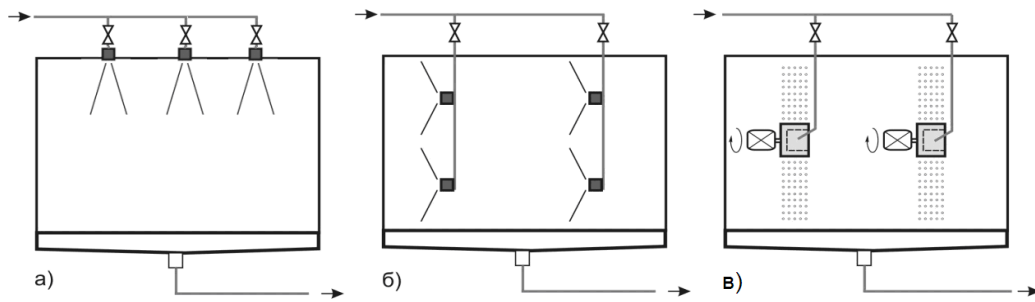


Рис. 3. Схемы расположения распылителей на лабораторной установке при исследованиях эффективности работы камеры орошения на основе: а – мелкодисперсных гидравлических форсунок; б – широкофакельных тангенциальных форсунок; в – ПВР

– систему распыления на основе мелкодисперсных гидравлических форсунок с направлением факела распыла «сверху вниз» (рис. 3а);

– систему распыления с широкофакельными форсунками, расположенными на вертикальных стояках в два ряда (рис. 3б). Распылять воду можно по направлению потока воздуха – «прямоток», против направления воздуха – «противоток», а также этими двумя способами – «смешанный режим»;

– систему распыления на основе одного ряда ПВР или двух (рис. 3в).

Все указанные системы распыления позволяют управлять процессами адиабатного увлажнения воздуха, в результате которых непосредственно после камеры орошения можно получить приточный воздух с требуемой температурой по сухому термометру  $t_{II}$  при постоянной фиксированной температуре по мокрому термометру  $t_m$  (процесс К-П на рисунке 4а). Точкой К обозначены параметры воздуха после первой ступени подогрева; точкой П – конечные параметры воздуха после камеры орошения.

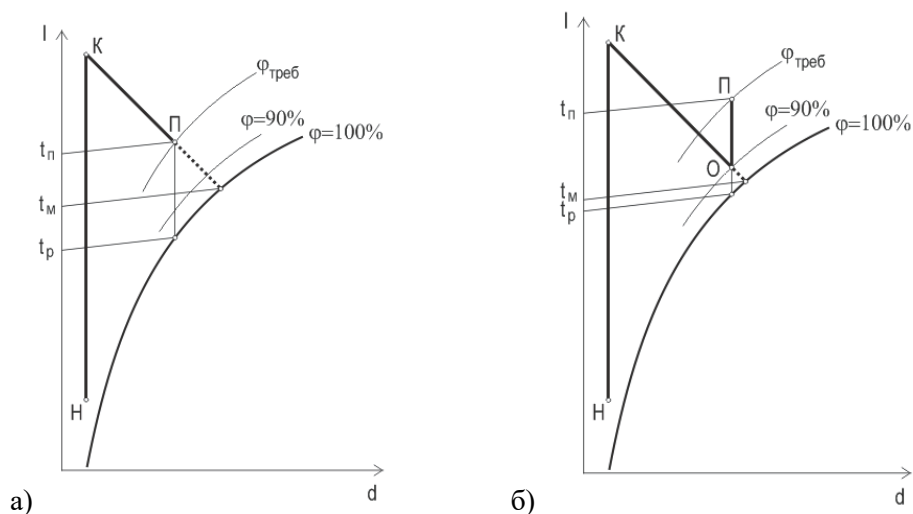


Рис. 4. I-d диаграмма процесса адиабатной обработки воздуха: а – при управляемом распылении; б – при полидисперсном распылении

Управляемые адиабатные процессы качественно отличаются от способа «регулирования влажности воздуха по точке росы» (рис. 4б), используемого в большинстве центральных кондиционеров, так как не требуют второй ступени подогрева. Постоянную температуру воздуха по мокрому термометру могут поддерживать датчики температуры, устанавливаемые в поддоне камеры орошения, которые воздействуют на устройства, изменяющие расход теплоносителя в теплообменнике первого подогрева.

Следует отметить, что верхнее расположение форсунок в предлагаемой конструкции камеры орошения представляется наиболее удачным решением, при котором поперечное сечение камеры свободно от распределительных коллекторов, а сами форсунки доступны для обслуживания при их компактном размещении на откидной крышке камеры.

### Результаты исследования и их обсуждение

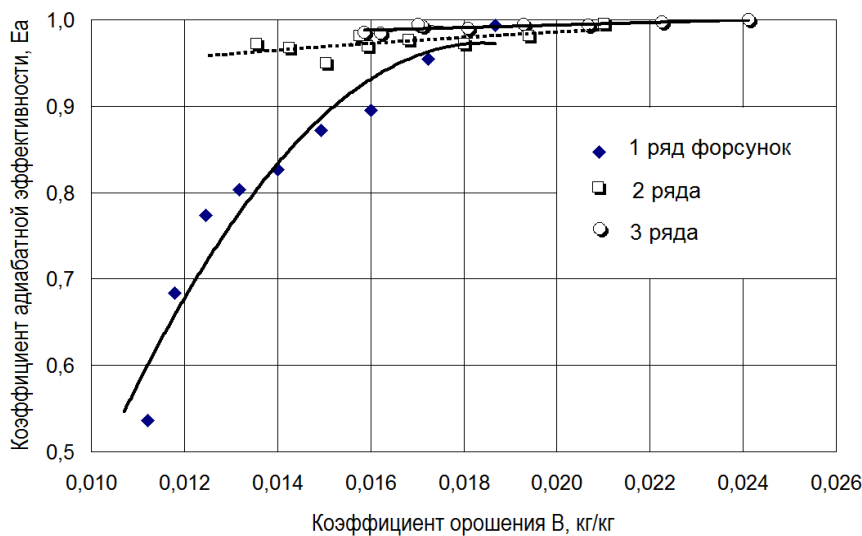
Как было отмечено ранее, использование лабораторного стенда при изучении дисциплины «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» дает возможность применять практико-ориентированное обучение в вузе.

При проведении лабораторных работ с каждой из представленных на рисунке 3 схем студенты снимают показания с контроллера 10 и заносят их в журнал испытаний (пример заполнения журнала приведен в таблице). Выполняя работу, студенты определяют температуру мокрого термометра  $t_{м1}$  построением процесса обработки воздуха на  $I-d$  диаграмме, учитывая интенсивность подачи воды и воздуха в каждом эксперименте. Результаты расчетов коэффициентов  $B$  и  $E_a$  также заносятся в таблицу измерений. После завершения расчетов делается вывод об эффективности работы камеры в исследованном режиме.

Журнал для разного числа подключенных мелкодисперсных гидравлических форсунок  $n$

Расход воздуха $G$ , кг/ч	$n$	Показания ротаметра	Расход воды $W$ , кг/ч	Коэфф. орошения $B$ , кг/кг	Параметры обрабатываемого воздуха				Адиабатн. коэфф. $E_a$
					Вход в камеру		Выход из камеры		
					$t_1$ , °C	$\phi_1$ , %	$t_{м1}$ , °C	$t_2$ , °C	
1800	1	24	20,17	0,0112	25,3	40,0	16,35	20,5	0,54
1800	2	29	24,37	0,0135	24,3	44,7	16,38	16,6	0,97
1800	3	34	28,57	0,0159	24,3	44,7	16,38	16,5	0,98
1710	1	24	20,17	0,0118	25,0	42,3	16,52	19,2	0,68
1710	2	29	24,37	0,0143	24,5	44,7	16,54	16,8	0,97
1710	3	33	27,73	0,0162	24,3	45,3	16,48	16,6	0,98
1620	1	24	20,17	0,0125	24,8	42,5	16,40	18,3	0,77
1620	2	29	24,37	0,015	24,3	44,2	16,30	16,7	0,95
1620	3	33	27,73	0,0171	24,3	45,7	16,54	16,6	0,99
1530	1	24	20,17	0,0132	24,7	42,8	16,86	18,4	0,8
1530	2	29	24,37	0,0159	24,3	45,8	16,56	16,8	0,97

1530	3	31	26,05	0,017	24,2	45,7	16,46	16,5	0,99
1440	1	24	20,17	0,014	24,5	43,8	16,39	17,8	0,83
1440	2	27	22,69	0,0158	24,1	46,8	16,56	16,7	0,98
1440	3	31	26,05	0,0181	24,1	46,5	16,52	16,6	0,99
1350	1	24	20,17	0,0149	24,4	44,9	16,49	17,5	0,87
1350	2	27	22,69	0,0168	24,0	47,1	16,53	16,7	0,98
1350	3	31	26,05	0,0193	23,9	45,3	16,16	16,2	0,99
1260	1	24	20,17	0,016	24,2	45,2	16,38	17,2	0,9
1260	2	27	22,69	0,018	23,8	48,5	16,60	16,8	0,97
1260	3	31	26,05	0,0207	23,9	47,1	16,45	16,5	0,99
1170	1	24	20,17	0,0172	24,1	46,8	16,56	16,9	0,95
1170	2	27	22,69	0,0194	23,6	50,0	16,67	16,8	0,98
1170	3	31	26,05	0,0223	23,7	48,3	16,48	16,5	1



*Рис. 5. Зависимость коэффициента адиабатной эффективности  $E_a$  от коэффициента орошения  $B$  при разном количестве рядов включенных мелкодисперсных гидравлических форсунок*

Результаты испытаний студенты также представляют графически, в частности в виде зависимости коэффициента  $E_a$  от коэффициента  $B$  и числа рядов форсунок (рис. 5). На основе анализа таблицы измерений и полученной зависимости студенты определяют, что для данной конструкции оросительной камеры коэффициент  $B$  находится в пределах от 0,01 до 0,024. Следовательно, камера орошения относится к камерам малой интенсивности. Диапазон значений  $B$ , в котором  $E_a$  меняется сильнее всего, достаточно широк (от 0,01 до 0,019), что позволяет использовать первый ряд форсунок при необходимости прецизионного изменения влажности в холодный период года. При включении второй и третьей дополнительных линий форсунок коэффициент  $E_a$  приближается к единице и незначительно зависит от коэффициента орошения  $B$ . Таким образом, студенты могут сделать вывод, что в адиабатической камере орошения с 2 и 3 работающими рядами форсунок можно осуществлять любые процессы обработки воздуха, включая испарительное охлаждение.



Во время проведения лабораторной работы студенты наглядно получают знания о том, что важным преимуществом управляемых процессов в системах вентиляции и кондиционирования воздуха является экономия тепловой энергии в холодный и переходный периоды года, которая достигается благодаря возможности поддержания в обслуживаемых помещениях допустимых нормами параметров воздуха при минимальных значениях энтальпии и относительной влажности (т.е. при  $\varphi=30\%$ ). Студенты также делают вывод о том, что при применении прямоточных систем с управляемым распылением определенная экономия достигается за счет меньшей поверхности нагрева, так как нет необходимости в теплообменниках второго подогрева.

### **Заключение**

Созданный лабораторный стенд позволяет проводить экспериментальные исследования по оценке эффективности оросительных камер с различными типами распылителей, например форсунками или ПВР. Проведенный анализ использования лабораторного стенда подтверждает эффективность его применения при практико-ориентированном подходе в образовательном процессе. Лабораторный стенд может быть использован в учебном процессе при изучении дисциплины «Кондиционирование и холодоснабжение», а также при проведении научных исследований в рамках магистратуры по программе подготовки «Системы теплогазоснабжения и вентиляции».

### **Список литературы**

1. Ахмерова Г.М., Сафиуллин Р.Г. Использование современной лабораторной базы в подготовке магистров профиля «Системы теплогазоснабжения и вентиляции» // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 3(80). С. 191-199.
2. Пахтусова Н.А., Подмарева А.В., Самсонова И.Г. Интеграция практико-ориентированного и теоретического подходов как необходимое условие подготовки современных кадров в профессионально-педагогическом образовании // Современная высшая школа: инновационный аспект. 2021. Т. 13. № 4. С. 33-41. DOI: 10.7442/2071-9620-2021-13-4-33-41
3. Семенова И.Н., Слепухин А.В. Принципы проектирования лабораторного практикума блока информационно-технологических дисциплин для формирования и развития профессиональных педагогических умений в контексте компетентностного и деятельностного подходов // Педагогическое образование в России. 2021. № 5. С. 79-89. DOI: 10.26170/2079-8717\_2021\_05\_09.

4. Кондаков С.А. Лабораторно-практическое пособие как средство реализации практико-ориентированного подхода в преподавании физики в вузе // Современная высшая школа: инновационный аспект. 2022. Т. 14. № 1. С. 83-91. DOI: 10.7442/2071-9620-2022-14-1-83-91
5. Бройда В.А. Аналитическое исследование работы естественной вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания со стабилизаторами расхода воздуха в холодный период года // Известия КГАСУ. 2023. №1(63). С.43-51. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_1\_43.
6. Бройда В.А., Дорофеев Н.С. Эффективность прямого естественного охлаждения в системе кондиционирования воздуха для помещений со значительными поступлениями тепла // Известия КГАСУ. 2019. № 4 (50). С. 279-287.
7. Гвоздков А.Н. Процесс тепло- и влагообмена в системе «воздух-вода» с позиции теории потенциала влажности // Известия Вузов. Строительство. 2015. №11-12 (683-684). С.31-41.
8. Тарабанов М. Г., Прилепский Д. В. Энергоэффективные камеры орошения в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 5. С. 24-33.
9. Прилепский Д. В., Конструктивные особенности камеры орошения с поперечным расположением форсунок // Вестн. Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 35 (54). С. 177-181.
10. Jiang J.J., Liu X.H., Jiang Y. Experimental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 61, Is. 2. P. 678-689.
11. Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г., Фокин В. М. Экспериментальное исследование воздушного вихря центробежных форсунок камер орошения в системах кондиционирования воздуха // Вестн. Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 35 (54). С. 182-188.