Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: ректор
Дата подписания: 03.07.2023 16:46:46
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

М.Г. Беренгартен, М.Г. Лагуткин

КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГРАДИРЕН

Учебное пособие

Текстовое электронное издание

Москва
2023

Об издании 1, 2

УДК 66.045.53(075.8)
ББК 38.728.3я73
Б48

Рецензенты:
Ю.А. Таран, к.т.н., доцент РТУ МИРЭА;
Д.А. Некрасов, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Техника низких температур имени П.Л. Капицы» Московского Политеха

Беренгартен, М.Г.

Б48 Контактные устройства для градирен: учебное пособие / М.Г. Беренгартен, М.Г. Лагуткин. – Москва: Московский Политех, 2023. – 1 CD-R. – Загл.с титул. экрана. – Текст: электронный.
ISBN 978-5-2760-2790-6.

Приведены сведения по расчёту и конструированию градирен с применением новых перспективных конструкций контактных устройств, а также капле улавливающих устройств, которые широко применяются не только в градирнях, но и в ряде других аппаратов.

Предназначено для подготовки бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов, обучающихся по различным направлениям и специальностям, учебные планы которых включают разделы, связанные с курсом «Процессы и аппараты химической технологии». Пособие также будет востребовано специалистами, занимающимися разработкой и эксплуатацией технологического оборудования.

УДК 66.045.53(075.8)
ББК 38.728.3я73

Системные требования: PC-совместимый процессор 1,3 ГГц и выше. Оперативная память (RAM): 256 Мб. Необходимо на винчестере: 350 Мб. Операционные системы: Windows, Mac OS. Видеосистема: разрешение экрана 1024x768. Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader 9 и выше.

ISBN 978-5-2760-2790-6

© Беренгартен М.Г., Лагуткин М.Г., 2023
© Московский Политех, 2023

Содержание

ВВЕДЕНИЕ **5**

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И РАСЧЕТА ГРАДИРЕН **10**

1.1. Промышленные аппараты испарительного охлаждения циркуляционной воды 10

1.2. Теория процесса испарительного охлаждения 19

1.3. Гидродинамика капельно-пленочных регулярных насадок 24

1.4. Основные направления интенсификации процесса испарительного охлаждения 25

1.5. Примеры конструкций современных насадок для оросителей градирен 27

Контрольные вопросы *30*

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УКЛАДКИ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ НАСАДОК **32**

Контрольные вопросы *39*

ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРОТКОСЛОЕВОЙ НАСАДКИ ГРАДИРЕН **40**

3.1. Регулярная насадка с косыми гофрами 40

3.2. Стенд для проведения гидродинамических испытаний 44

3.3. Стенд для проведения тепломассообменных испытаний 48

3.4. Методика обработки результатов тепломассообменных и гидродинамических испытаний насадок 53

3.4.1. Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи по результатам тепломассообменных испытаний 53

3.4.2. Тепломассообменные испытания короткослоевых насадок 59

3.4.3. Гидродинамические испытания короткослоевых насадок 62

3.4.4. Определение рационального способа укладки короткослоевой насадки 67

Контрольные вопросы *71*

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КАПЛЕУЛАВЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ 72

4.1. Перспективы интенсификации каплеулавливающей техники 72

4.2. Механизмы процесса улавливания капель 73

4.3. Типы каплеулавливающих устройств 74

4.4. Конструкции насадочных элементов каплеулавливающих устройств 82

4.5. Основные характеристики насадок 90

4.6. Задержка жидкости и коэффициент смачиваемости поверхности насадочного слоя 95

4.7. Методы расчета эффективности каплеулавливания 96

4.8. Разработка новых типов насадки и каплеулавливающих устройств 99

4.9. Описание конструкции разработанной новой кольцевой керамической насадки типа N3C. Геометрические характеристики 101

4.10. Экспериментальная установка для исследования каплеулавливающих и гидравлических свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C 104

4.11. Методика проведения исследований каплеулавливающих свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C 108

4.12. Методика проведения исследований гидравлических свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C 109

4.13. Разработка и исследование нового способа укладки керамической кольцевой насадки. Экспериментальные установки и методика проведения испытаний 109

4.14. Экспериментальная установка для исследования гидравлических характеристик нового способа укладки керамической кольцевой насадки 114

4.15. Исследование гидравлических свойств новых насадок 117

Контрольные вопросы 126

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 127

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 128

ВВЕДЕНИЕ

В современных промышленных установках теплоэнергетики, химической, металлургической, химической и смежных отраслях промышленности в течение многих десятилетий широко используются градирни – аппараты испарительного охлаждения.

В процессах испарительного охлаждения используется возможность отведения большого количества теплоты за счет испарения воды. Вода, обладающая многими уникальными физическими и физико-химическими свойствами, характеризуется в том числе и очень высокой удельной теплотой испарения. При атмосферном давлении и температуре кипения удельная теплота парообразования (конденсации) воды составляет $2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг. При температурах ниже температуры кипения удельная теплота испарения воды выше; например, при атмосферном давлении и 30 ^{0}C она составляет $2{,}4 \cdot 10^6$ Дж/кг. Это существенно выше, чем при испарении других жидкостей (например, при атмосферном давлении и температуре кипения таких растворителей, как этиловый спирт, поглощается только $0{,}9 \cdot 10^6$ Дж/кг, этиловый эфир – только $0{,}4 \cdot 10^6$ Дж/кг). Удельная теплота испарения воды при этом намного больше, чем физическая теплота, требуемая для нагрева воды (обладающей одной из самых высоких теплоемкостей – 4200 Дж/кг$\cdot^0$C), – для нагрева того же 1 кг воды от 0 до 100 ^{0}C поглотится, следовательно, $4{,}2 \cdot 10^5$ Дж теплоты, т.е. примерно в 5 раз меньше, чем при испарении 1 кг воды.

Охлаждение при испарении – физическое явление, при котором испарение жидкости в окружающий воздух охлаждает объект или контактирующую с ним жидкость. Простым примером природного испарительного охлаждения является потоотделение, при котором тело человека выделяет пот для собственного охлаждения – на каждый килограмм испарённой воды отводятся те же $2{,}4 \cdot 10^6$ Дж, что позволяет простым способом осуществлять терморегуляцию человеческого организма.

Исторически испарительное испарение начали впервые применять для удаления воды из растворов каменной соли. Само название «градирня» происходит от немецкого глагола gradieren, одним из значений которого является «повышать уровень» (Grad) концентрации при пропускании воздуха через раствор солей,

например, при концентрировании морской воды. Испарившаяся при этом вода выносится в окружающую среду потоком воздуха[1].

Термин «испарительное охлаждение» означает охлаждение жидкости в результате процессов тепло- и массообмена, происходящих при непосредственном соприкосновении свободной поверхности жидкости с каким-либо газом или смесью газов, например с атмосферным воздухом.

При этом понижение температуры жидкости происходит в результате трех процессов

– теплоотдачи соприкосновением;

– излучения;

– поверхностного испарения жидкости.

Вклад каждого из этих тепловых и тепломассообменных процессов может быть различным в зависимости от физических свойств и параметров газа и жидкости. При использовании градирен для охлаждения воды при контакте с атмосферным воздухом в течение большей части года преобладает влияние поверхностного испарения, на долю которого приходится 80–90 % отводимой теплоты, и лишь 10–20 % – на теплоотдачу соприкосновением. При низких температурах наружного воздуха это соотношение меняется: от 30 до 50 % приходится на теплоотвод при поверхностном испарении и 50–70 % – на теплоотвод при соприкосновении. Теплообмен излучением в водоохлаждающих устройствах существенной роли не играет, и его не принимают во внимание.

Основное направление использования градирен в настоящее время – это системы оборотного водоснабжения в различных отраслях промышленности; такие градирни эксплуатируются практически на всех крупных объектах в энергетике, химической и нефтехимической промышленности, пищевой, фармацевтической и ряде других отраслей промышленности.

На всех этих промышленных объектах приходится сталкиваться с необходимостью отведения большого количества теплоты

---

[1] Испарившаяся вода при этом захватывает с собой некоторое количество солей, что используется, в том числе, в качестве лечебного средства для лечения некоторых заболеваний дыхательных путей. Например, такие «соляные градирни» имеются в соляной шахте «Величка» неподалеку от Кракова (Польша), где для лечения используется уникальный микроклимат – воздух, лишенный примесей и аллергенов, богатый микроэлементами, с постоянной температурой и высокой влажностью.

с помощью воды как хладагента. Из огромных количеств потребляемой промышленностью воды преобладающая доля используется именно для охлаждения.

Применение охлаждающей воды в одних случаях связано с осуществлением собственно технологического процесса, например с конденсацией отработавшего пара после расширения его в паровых двигателях или на паровых турбинах, в других – с предохранением от быстрого разрушения отдельных элементов конструкций, например кладки производственных печей или стенок высокотемпературных аппаратов.

В зависимости от назначения охлаждающей воды требования к ней в отношении температуры и содержания примесей могут быть различными. Чаще всего требуется, чтобы температура охлаждающей воды не превышала сравнительно невысокого предела, а содержание в ней примесей не приводило к образованию твердых отложений (накипи) или коррозии конструкционных материалов.

Например, в случае тепловых (паротурбинных) электростанций повышение температуры охлаждающей воды приводит к увеличению расхода топлива на выработку электроэнергии; в нефтепереработке повышение температуры охлаждающей воды может приводить к потере наиболее ценных легкокипящих фракций нефти и т.д. В случае образования накипи (твердых отложений) на стенках теплообменной аппаратуры происходит ухудшение условий теплообмена.

Как правило, вода, используемая для охлаждения в теплообменной аппаратуре, должна пройти предварительную водоподготовку, прежде всего для устранения из нее солей жесткости. Оборотная вода после ее охлаждения в аппаратах испарительного охлаждения уже не будет содержать солей жесткости и других примесей, поэтому достаточно дорогостоящая операция водоподготовки потребуется лишь для сравнительно небольшого количества свежей воды, необходимой для пополнения оборотной воды, испарившейся при охлаждении в атмосферу.

Использование оборотной воды на предприятиях теплоэнергетической, химической, нефтеперерабатывающей и металлургической отраслей составляет от 60 до 96 % общего водопотребления.

В градирнях, представляющих собой полые башни с расположенными в ней контактными элементами, сверху разбрызгивается

теплая (горячая) вода, которую нужно охладить, а снизу вверх либо за счет естественной тяги, либо за счет нагнетания вентилятором поступает холодный воздух. Горячая вода в градирне охлаждается как за счет контакта с холодным воздухом (прямого теплообмена), так и (в основном) за счет поглощения теплоты при испарении части потока воды. При испарительном охлаждении вода течет в градирне в виде пленки и капель, при этом испаряется только 1–2 % воды (эта вода уносится в атмосферу потоком воздуха, и именно это количество воды требует подпитки в системе оборотного водоснабжения). Основное количество теплоты передается от воды воздуху именно за счет испарения (массообмена). Остальная теплота отдаётся за счет прямого теплообмена соприкосновения воды с холодным воздухом.

Для повышения эффективности работы градирен, в которых осуществляется тепломассообменный процесс, необходимо, с одной стороны, увеличивать коэффициенты тепло- и массопередачи, а, с другой, – развивать поверхность контакта фаз.

Первоначально в первой половине XX века в качестве контактного устройства для градирен использовали регулярную насадку из древесины в виде досок или планок, уложенных определенным образом перпендикулярно основным направлениям движения потоков. Примерно тогда же в химической широко стали применяться насадки правильной геометрической формы – керамические кольца Рашига, диаметр которых примерно равен высоте, и другие.

В середине 60-х годов XX века в мировой практике использовалось не более 10 различных насадок правильной формы. В следующие десятилетия количество новых регулярных и нерегулярных контактных насадочных устройств существенно расширилось.

При применении более эффективных насадочных устройств будет увеличиваться не только поверхность контакта фаз (экстенсивный фактор), но и интенсивность процессов тепло- и массопередачи.

В настоящем учебном пособии подробно рассмотрены теоретические основы гидродинамики и тепломассообмена при испари-

тельном охлаждении, конструктивные особенности градирен различного типа, основные принципы их работы и конструирования, варианты и анализ применения современных контактных элементов в градирнях, а также конструктивные особенности каплеулавливающих устройств.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также студентов и аспирантов, обучающихся по другим направлениям и специальностям, учебные планы которых включают разделы, связанные с курсом «Процессы и аппараты химической технологии».

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И РАСЧЕТА ГРАДИРЕН

1.1. Промышленные аппараты испарительного охлаждения циркуляционной воды

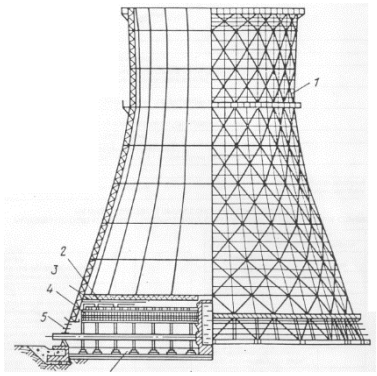
В СССР начиная с середины XX века градирни строились по типовым проектам. В промышленности и энергетике применяются два основных вида градирен: башенные градирни с естественной тягой и вентиляторные градирни с принудительной тягой. Для химических и нефтехимических предприятий разработаны несколько модификаций градирен с площадью сечения 400 м^2 и 1200 м^2 (СК-400 и СК-1200). В последние десятилетия широкое распространение получили градирни сравнительно небольшой производительности, поставляемые на предприятия в готовом виде и называемые по этому признаку малогабаритными (рис. 1.1.1) [1].

Охлаждение воды с помощью вентиляторных градирен является в настоящее время наиболее распространенным и эффективным способом.

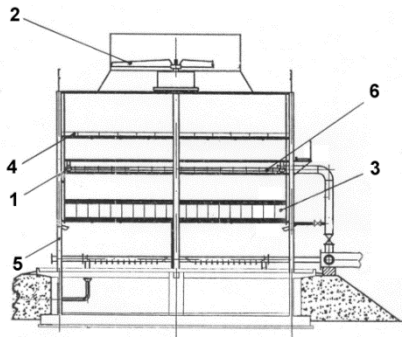
В настоящее время на предприятиях химической промышленности РФ насчитывается более 1400 вентиляторных градирен, обслуживающих системы оборотного водоснабжения. Большинство из них построены в 1970–1980 гг. и требуют ремонта или реконструкции с применением современных материалов и технологического оборудования.

Выбор определенного типа градирни учитывает многие технические характеристики. Главные конструктивные параметры градирен определяются технико-экономическим расчетом.

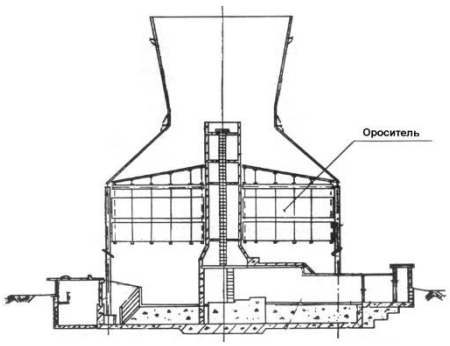
Они зависят от температуры и объема охлаждаемой воды, а также от параметров атмосферы (температурного и влажностного режимов) в регионе, где будет установлена конструкция. Плотность орошения является одной из основных характеристик градирни.



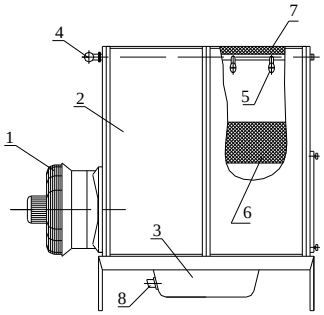
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.1.1. Виды градирен в системах оборотного водоснабжения:
а) Башенная градирня, 1 – вытяжная башня, 2 – водоуловитель,
3 – водораспределительная система, 4 – оросительное устройство,
5 – воздухорегулирующее устройство, 6 – водосборный бассейн,
б) Секционная градирня, 1 – корпус; 2 – вентилятор; 3 – блоки насадки,
4 – секции водоуловительных решеток, 5 – воздуховходные окна,
6 – водораспределительная система;
в) градирня СК-400; г) Малогабаритная градирня ККТ-100,
1 – вентилятор; 2 – корпус, 3 – поддон, 4 – подающий патрубок
водораспределительной системы, 5 – водоразбрызгивающая форсунка,
6 – насадка (ороситель), 7 – водоуловитель, 8 – сливной патрубок

Наиболее эффективными с технической точки зрения являются вентиляторные градирни. Они обеспечивают качественное охлаждение водных потоков. Такие конструкции переносят значительные удельные тепловые нагрузки.

Принципиальная схема вентиляторной градирни с вытяжным вентилятором приведена на рис. 1.1.2.

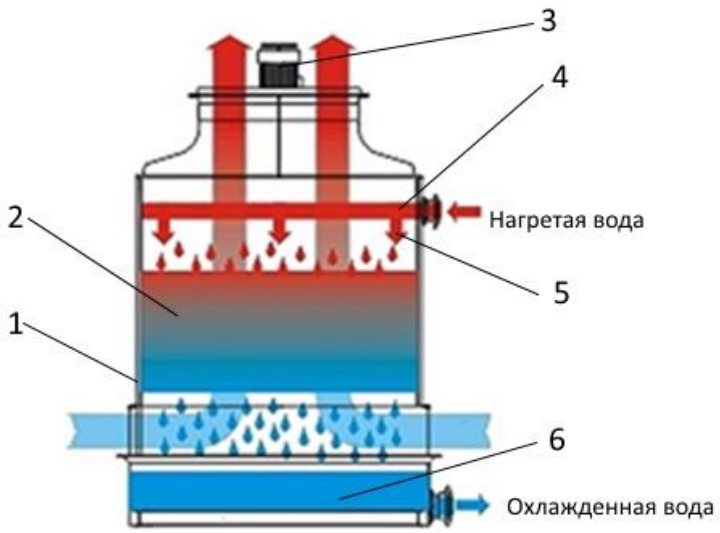


Рис. 1.1.2. Принципиальная схема вентиляторной градирни: 1 – корпус; 2 – ороситель; 3 – вентилятор; 4 – коллектор распылителя нагретой воды; 5 – форсунка; 6 – поддон сбора охлажденной (оборотной) воды

Вентиляторная градирня – это устройство, предназначенное для дисперсии в атмосферном воздухе потока теплоты, полученного охлаждающей водой в охладительных устройствах. В градирне происходит непосредственный контакт охлаждаемой воды с атмосферным воздухом.

Теплая вода из основного охлаждающего устройства попадает в главный коллектор водораспределителя. Далее происходит ее транспортирование через систему труб к форсункам. Форсунки распыляют струи воды на ороситель (насадку), создавая на его поверхности пленку воды с большой поверхностью контакта. Вода, отрывающаяся от нижних краев элементов стока оросителя, опадает в форме дождя в поддон, находящийся под градирней, откуда с помощью насоса нагнетается обратно в основное охлаждающее устройство.

Процесс охлаждения воды проходит, в главной мере, за счет испарения протекающей струей воздуха небольшой части струи охлаждаемой воды (транспорт массы), с использованием теплоты фазового перехода (теплоты испарения), получаемой от водной струи, а также – в меньшей мере – за счет конвективного теплообмена между водой и воздухом (транспорт теплоты).

Противоточное течение воздуха в градирне, создается вытяжным воздействием осевого вентилятора, производительность которого подобрана в соответствии с требуемыми параметрами охлаждения. Вентилятор установлен внутри корпуса, на перекрытии отсека градирни. Воздух втягивается внутрь отсека через входные окна, оснащенные жалюзи, которые предохраняют от попадания твердых тел из окружающей среды, например листьев, а также от разбрызгивания охлаждаемой воды вне градирни. Далее втянутый воздух проходит через зону дождя под оросителем, через оросительное заполнение, в зону разбрызгивания воды над оросителем. Подогретый и увлажненный воздух протекает через вентилятор, после чего через верхний разрез корпуса вентилятора выдувается наружу, в окружающую среду.

Перед вентилятором установлен каплеуловитель, в котором происходит захват капель и отвод их в поддон, что сводит к минимуму потерю воды из-за выброса капель за пределы градирни.

Степень охлаждения воды в градирне зависит от температуры термометра влажного воздуха, втягиваемого снаружи, объема воздуха (производительности вентилятора) и технических решений самой градирни. Градирни проектируются для получения ожидаемого эффекта охлаждения в наиболее неблагоприятных условиях (высокая температура и влажность воздуха) и с учетом необходимости вывода максимального количества теплоты из воды. Под аналогичные условия подбирается также мощность вентилятора. При понижении температуры наружного воздуха, или уменьшении количества теплоты, которое следует отводить, установленная мощность становится излишней. Для понижения эксплуатационных расходов, а также для улучшения безопасности эксплуатации, в приводах вентилятора могут быть установлены двухскоростные двигатели или двигатели с устройствами регулирования частоты вращения.

Для обеспечения стабильной и безопасной работы системы охлаждения необходимо сохранять соответствующие свойства охлаждаемой воды, так как из-за постоянного испарения, в ней растет концентрация химических и механических соединений.

Целесообразно сравнивать градирни по следующим основным эксплуатационным характеристикам:

– теплосъем;

– расход воды;
– потеря воды при испарении;
– температурный перепад;
– мощность электродвигателя вентилятора;
– габариты;
– масса без воды;
– масса в процессе эксплуатации.

В РФ и за рубежом производятся десятки модификаций вентиляторных градирен в широком диапазоне основных характеристик. Ограничимся обзором малогабаритных градирен с расходами охлаждаемой воды до 250 м^3/ч. Общий вид некоторых типов вентиляторных градирен представлен на рис. 1.1.3–1.1.7, а их характеристики – в таблицах 1.1.1–1.1.3 [2–4].



Рис. 1.1.3. Модульная вентиляторная градирня МВГ-44 «Вихрь» [2]



Рис. 1.1.4. Градирня малогабаритная вентиляторная ГМВ-20 «Мини» [2]



Рис. 1.1.5. Градирня малогабаритная вентиляторная ГМВ-100 «Супер» [2]



Рис. 1.1.6. Градирни типа «Росинка» [3]



Рис. 1.1.7. Градирни типа ГРАД [4]

Таблица 1.1.1

Характеристики малогабаритных вентиляторных градирен типа «Вихрь» [2]

Название параметра	Ед. изм.	Значение		
Название градирни		МВГ-44 «ВИХРЬ»	МВГ-47 «ВИХРЬ»	МВГ-77 «ВИХРЬ»
Условия эксплуатации				
Диапазон производительности градирни по воде	$м^3$/ч	45–85	50–100	60–110
Номинальная производительность градирни по воде	$м^3$/ч	60–75	70–90	80–100
Максимальная температура нагретой воды на входе в градирню	°С	не более 65	не более 65	не более 65
Капельный вынос	%	0,007	0,007	0,007
Потери на испарение при ЛТ -10 °С и температуре воздуха 28–30 °С	%	1,5	1,5	1,5
Давление в напорном патрубке у основания градирни	м вод.ст.	4–5	4–5	4–5
Конструкция градирни				
Вид градирни		Противоточная вытяжная	Противоточная вытяжная	Противоточная вытяжная
Количество секций	шт	1	1	1
Габариты градирни	м	2,40 х 2,40	2,40 х 2,70	2,70 х 2,70
Габариты секции	м	2,40 х 2,40	2,40 х 2,70	2,70 х 2,70
Общая высота градирни без поддона / с учетом поддона	м	3,486/3,906	3,813/4,233	3,560/3,980
Количество фланцев ввода воды	шт х мм	1 х 150	1 х 150	1 х 150
Площадь орошения (рабочее сечение оросителя)	$м^2$	5,76	6,48	7,29
Вентиляторная установка				
Количество вентиляторов	шт.	1	1	1
Тип установки		Осевая	Осевая	Осевая
Тип соединения мотора и вентилятора		Прямой привод	Прямой привод	Прямой привод
Диаметр вентилятора	мм	1500	1500	1500
Частота вращения	об/мин	750	750	750
Номинальная мощность электродвигателя	кВт	1 х 7,5	1 х 7,5	1 х 9,0

Таблица 1.1.2

Характеристики малогабаритных вентиляторных градирен типа «Росинка» [3]

		Росинка 5	Росинка 10/20	Росинка 30/40	Росинка 50/60	Росинка 80/100
Расход воды	$м^3/ч$	5	10…20	30…40	50…60	80…100
Перепад температур	^0C	6,4	9…6,4	7…6,4	6…5	6,3…5,7
Теплосъем	кВт	37	125	271	349	620
Капельный унос, не более	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Вентилятор ВО 06–300	исполнение	4	6,3	8	10	12,5
Мощность электродвигателя	кВт	0,25	1,1	3	3	4
Габариты	мм					
длина		1200	1700	2300	2200	2800
ширина		700	1100	1300	1700	2300
высота		1700	2000	2300	3500	3900
Масса без воды	кг	210	400	600	1420	2100

Таблица 1.1.3

Характеристики малогабаритных вентиляторных градирен фирмы «Балтэнергомаш» [4]

Название параметра	ГРАД					
	8	20М	50	75	120	280
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Количество охлаждаемой воды, $м^3/час$	8	20	50	75	120	280
Площадь поверхности оросителя, $м^2$	65	175	350	378	756	1869
Расчетный тепловой поток при разности температур по воде $\Delta t = 5\ ^oC$, кВт	46	120	300	450	700	1620
Диапазон регулирования производительности, %	40÷100	45÷100	50÷100	40÷100	40÷100	40÷100
Количество форсунок, шт.	2	4	10	12	21	48
Площадь орошения, $м^2$	0,50	0,95	1,89	3,77	3,77	10,00
Количество вентиляторов, шт.	1	1	1	1	1	1
Тип вентилятора	06–300	06–300	06–300	06–300	06–300	13–284
Диаметр рабочего колеса, мм	500	630	800	1250	1250	1600

Окончание табл. 1.1.3

1		*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Установленная мощность электродвигателя, кВт		0,37	0,75	3,0	7,5	7,5	15,0
Масса, кг		125	288	520	844	990	2230
Габариты, мм	длина	780	974	1940	1940	1940	4770
	ширина	640	908	902	1884	1940	2950
	высота	1940	2950	3417	3282	3750	4250

Основные конструктивные отличия заключаются во взаимном расположении составляющих элементов и конструкции оросителя.

Нагнетательные вентиляторы применяются для градирен с площадью орошения не более 16 м^2.

С конструктивной точки зрения установка нагнетательных вентиляторов более проста, и они более устойчивы ввиду того, что их можно располагать на фундаментах, непосредственно на земле или на крыше здания. Облегчается доступ для их ремонта и обслуживания, проще соединения с электродвигателем, чем у всасывающих вентиляторов. С несущего каркаса градирни снимается нагрузка от вентилятора, редуктора и двигателя, что облегчает каркас и исключает возможность его вибрации во время работы вентилятора.

Недостатком является то, что в холодную погоду лопасти нагнетательного вентилятора могут обмерзать, так как на них попадают вместе с холодным воздухом частицы воды, выносимые из градирни. В вентиляторах, создающих разрежение, возможность обмерзания во время работы исключается, так как лопасти их постоянно омываются теплым воздухом.

Главным конструктивным элементом вентиляторной градирни является ороситель. От степени совершенства этого узла зависят основные тепло– и массообменные характеристики.

Одним из необходимых условий эффективной работы вентиляторных градирен является правильный выбор экономичных вентиляторов. Для градирен обычно используются специальные осевые отсасывающие или нагнетательные вентиляторы. При применении отсасывающих вентиляторов обеспечивается более равномерное распределение воздуха по поперечному сечению в основании градирни, чем при использовании нагнетательных, так как вход воздуха и поворот его под прямым углом для движения вверх

осуществляется при меньших скоростях. Снижение скорости движения воздуха при входе достигается благодаря использованию входных окон большого сечения со всех или с двух сторон градирни. Равномерность распределения воздуха является важным фактором в получении охладительного эффекта градирни.

1.2. Теория процесса испарительного охлаждения

Охлаждение воды в градирнях осуществляется путем передачи теплоты атмосферному воздуху за счет поверхностного испарения воды и теплопередачи соприкосновением (теплопроводность и конвекция). Тепло может отниматься от воды и за счет излучения. Однако количество теплоты, передаваемой излучением, настолько мало, что при составлении теплового баланса градирни им обычно пренебрегают.

Движущей силой процесса испарения воды в градирне является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока. При теплоотдаче соприкосновением движущей силой является разность температур воды и воздуха. В градирню поступает атмосферный воздух, являющийся влажным, так как всегда содержит в себе определенное количество паров воды. Для термических расчетов градирен с достаточной степенью точности принимается, что влажный воздух, который можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара, подчиняется законам смеси идеальных газов. Сухой воздух и пар занимают тот же объем, что и вся смесь [5].

Основными параметрами, характеризующими состояние влажного воздуха, являются давление, температура, плотность, влагосодержание, относительная влажность, энтальпия.

Задача любого теплового расчета градирен состоит в определении геометрических размеров (объема) насадки, обеспечивающих необходимый тепловой эффект в зависимости от определенных факторов: метеорологических условий, гидравлической нагрузки, требуемого перепада температур и температуры охлажденной воды.

Баланс теплоты, отдаваемой в градирне водой и воспринимаемой воздухом, представляется в следующем виде:

$$Q = c_{ж} [G_{ж} (t_1 - t_2) + G_{и} \cdot t_2] = G_{в} (i_2 - i_1) \qquad (1.2.1)$$

где $c_ж$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$G_ж$ – массовый расход воды, кг/с;

t_1 – температура нагретой воды, °С;

t_2 – температура охлажденной воды, °С;

$G_и$ – массовый расход испарившейся воды, кг/с;

$G_в$ – массовый расход воздуха, кг/с;

i_1 – удельная энтальпия воздуха на входе в градирню, Дж/кг;

i_2 – удельная энтальпия воздуха на выходе из градирни, Дж/кг.

Материальный баланс (баланс влаги) определяется равенством между количеством испарившейся жидкости и приращением влагосодержания воздуха:

$$G_и = G_в\,(x_2 - x_1) \qquad (1.2.2)$$

где x_1 – влагосодержание насыщенного воздуха на входе в градирню, кг/кг;

x_2 – влагосодержание насыщенного воздуха на выходе из градирни, кг/кг.

При тепловом расчете градирен задаются расходы и начальные параметры воды и воздуха, а конечные параметры t_2, i_2, x_2 остаются неизвестными. Этих двух уравнений (1.2.1) и (1.2.2) для определения конечных параметров недостаточно. Для определения этих параметров необходимо пользоваться уравнениями, описывающими процесс тепломассообмена между водой и воздухом в насадке градирни. Так как входящие в них параметры все время меняются по пути движения воды в насадке, уравнения могут быть составлены только в дифференциальном виде.

Для элементарного объема насадки противоточной градирни dV с единичной площадью и высотой dh имеем:

$$dQ = \alpha\,(t - \tau)\,dV + i''_п \cdot dG_ж, \qquad (1.2.3)$$

где $i''_п = c_ж \cdot t_1 + r$ – энтальпия пара при температуре воды t_1, Дж/кг;

t – температура воздуха, °С;

τ – температура воздуха по влажному термометру, °С;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С).

В (1.2.3) первый член правой части – теплота, передаваемая в элементарном объеме оросителя от воды к воздуху соприкосновением, а второй – теплота, передаваемая испарением.

Для определения количества испарившейся жидкости используют выражение

$$dG_{ж} = \beta_{xv}\,(x''\text{-}x)\,dV, \qquad (1.2.4)$$

подставляя которое в (1.2.1), получают

$$dQ = \alpha(t - \tau)\,dV + i''_{п}\,\beta_{xv}(x'' - x)\,dV. \qquad (1.2.5)$$

Совместные процессы тепло и массообмена протекают в градирне при условиях, удовлетворяющих существованию аналогии между ними и соответственно соотношению Льюиса:

$$\alpha/\beta_{xv} = c_{вл} \qquad (1.2.6)$$

С учетом (1.2.6)

$$dQ = \beta_{xv}\,[c_{вл}\,(t - \tau) + i''_{п}\,(x'' - x)]dV. \qquad (1.2.7)$$

Уравнение (1.2.7) с учетом зависимостей, характеризующих свойства влажного воздуха:

$$c_{вл} = c_{с.в} + c_{п}\,x \qquad (1.2.8)$$

$$i''_{п} \approx r + c_{п}\,t \qquad (1.2.9)$$

$$i''_{2} \approx c_{с.в}\,t + (r + c_{п}\,t)\,x''_{2} \qquad (1.2.10)$$

$$i_{1} \approx c_{с.в}\,\tau + (r + c_{п}\,\tau)\,x_{1}, \qquad (1.2.11)$$

можно привести к виду

$$dQ = \beta_{xv}\,(i''\text{-}i)\,dV \qquad (1.2.12)$$

или

$$Q = \beta_{xv}\int_{0}^{V}(i'' - i)\,dV = \beta_{xv}\Delta i_{ср}V \qquad (1.2.13)$$

После ряда преобразований с использованием (1.2.2) имеем

$$Q = (1/K)\cdot G_{ж}\cdot t\cdot c_{ж} \qquad (1.2.14)$$

где

$$K = 1 - c_{ж}\cdot t_{2}/r \qquad (1.2.15)$$

Тогда из (1.2.13) и (1.2.14) имеем

$$Q = \frac{1}{K} G_{\text{ж}} \Delta t c_{\text{ж}} = G_{\text{В}} \left(i_2 - i_1 \right) = \beta_{xv} \Delta i_{\text{ср}} V \qquad (1.2.16)$$

Для элементарного объема оросителя dV, принимается с достаточной точностью K = const, тогда

$$dQ = \frac{1}{K} G_{ж} c_{ж} dt = G_{в} di = \beta_{xv} \left(i'' - i \right) dV \qquad (1.2.17)$$

Из уравнений (1.2.16) и (1.2.17) могут быть получены формулы для подсчета объема насадки:

$$V = \frac{G_{ж} \Delta t c_{ж}}{K \beta_{xv} \Delta i_{ср}}, \qquad (1.2.18)$$

$$V = \frac{G_{\text{в}}}{\beta_{xv}} \int_{i_1}^{i_2} \frac{di}{i'' - i} \qquad (1.2.19)$$

$$V = \frac{G_{ж} c_{ж}}{K \beta_{xv}} \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{i'' - i} \qquad (1.2.20)$$

При этом $\Delta i_{\text{ср}}$ может быть представлено как

$$\Delta i_{\text{ср}} = \frac{\Delta t}{\int_{t_2}^{t_1} dt / \left(i'' - i \right)} \qquad (1.2.21)$$

$$\Delta i_{\text{ср}} = \frac{i_2 - i_1}{\int_{i_1}^{i_2} di / \left(i'' - i \right)} \qquad (1.2.22)$$

$$\Delta i_{\text{ср}} = \frac{\Delta t c_{ж}}{K \lambda \int_{i_2}^{i_1} di / \left(i'' - i \right)} \qquad (1.2.23)$$

Вычисление $\Delta i_{\text{ср}}$ по методу Бермана производится по формуле

$$\Delta i_{ср} = \frac{\left(i_1'' - i_2 \right) - \left(i_2 - i_1 \right)}{\ln \frac{i_1'' + i_2 - \delta i''}{i_2'' - i_1 - \delta i''}} \qquad (1.2.24)$$

где i_1 – удельная энтальпия воздуха в ядре потока при входе в градирню, Дж/кг;

i_2 – удельная энтальпия воздуха в ядре потока при выходе из градирни, Дж/кг;

i'' – удельная энтальпия насыщенного воздуха, Дж/кг;

i''_1 – удельная энтальпия насыщенного воздуха у поверхности воды на входе в градирню, Дж/кг;

i''_2 – удельная энтальпия насыщенного воздуха у поверхности на выходе из градирни, Дж/кг;

$\delta i''$ – поправка Л.Д. Бермана, которая равна

$$\delta i'' = \frac{i_1'' + i_2'' + 2i_m''}{4} \qquad (1.2.25)$$

где i''_m – энтальпия насыщенного воздуха при средней температуре воды, Дж/кг.

В расчетные формулы (1.2.18) – (1.2.20) для определения объема насадки входит объемный коэффициент массоотдачи β_{xv}, отнесенный к разности влагосодержаний. Теоретических методов для определения коэффициента β_{xv} не существует из-за неизвестной площади поверхности контакта воды с воздухом в объеме насадки. Поэтому β_{xv} находят экспериментально для каждого типа насадки по формуле, в которую подставляют результаты измерений параметров работы и размеров насадки.

$$\beta_{xv} = \frac{G_{ж}\Delta tc_{ж}}{KV\Delta i_{\text{ср}}} \qquad (1.2.27)$$

Значения β_{xv}, подсчитанные по формуле (1.2.27), действительны только для заданной конкретной градирни (насадки), работающей в тех условиях, при которых производились измерения входящих в эту формулу параметров, и не могут быть перенесены на другие градирни (насадки). Следовательно, на основе экспериментальных данных необходимо получить соответствующие эмпирические зависимости для определения β_{xv}.

Для сопоставления различных насадок часто используется число Меркеля [6, 7]:

$$\text{Me} = \frac{\beta_{xv}H}{q_{ж}} = \frac{\Delta tc_{ж}}{K\Delta i_{\text{ср}}} = AH\lambda^m \qquad (1.1.28)$$

где H – высота насадки, м; $q_{ж}$ – плотность орошения, м^3/(м^2·ч).

Представляется, что сравнение различных насадок по числу Меркеля возможно только при одинаковой высоте слоя насадки и одинаковой плотности орошения.

1.3. Гидродинамика капельно-пленочных регулярных насадок

Анализ результатов исследований, отраженных, в частности, в работах А.С. Пушнова и других исследователей [8–13] показывает, что на практике в компактных вентиляторных градирнях процесс течения жидкости через насадку не является чисто «пленочным» или «капельным». В большинстве случаев в разных по высоте участках насадок реализуются оба режима.

Гидродинамика капельно-пленочных насадок имеет достаточно сложный характер и для одной и той же насадки может изменяться по высоте насадки в зависимости от плотности орошения и скорости встречного потока воздуха. Описание гидродинамических режимов проиллюстрировано графически на рис. 1.3.1.

Первый режим – пленочный – наблюдается при небольших плотностях орошения на малых скоростях газа. В этом режиме отсутствует влияние газового потока на скорость стекания по насадке (участок до точки *A* – точки «подвисания» на линии для орошаемой насадки).

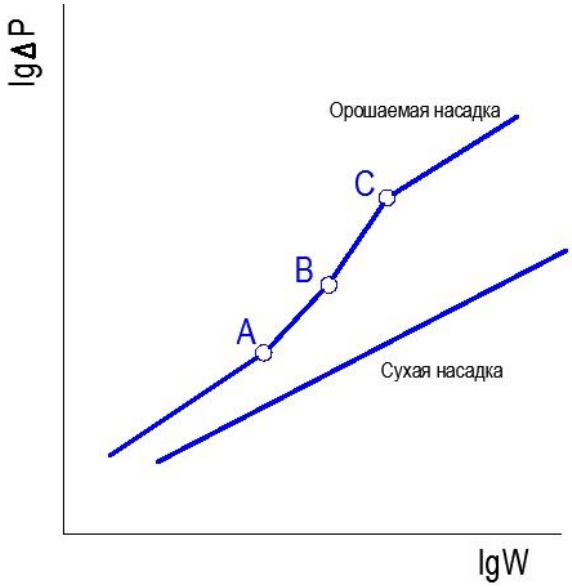


Рис. 1.3.1. Схема зависимости гидравлического сопротивления насадки от скорости газа

Второй режим – режим «подвисания» (или «торможения»). После точки *A* повышение скорости газа приводит к заметному увеличению сил трения о жидкость на поверхности контакта фаз и подтормаживанию жидкости газовым потоком. Вследствие этого скорость течения пленки жидкости уменьшается, а ее толщина и количество удерживаемой жидкости в насадке увеличиваются. В режиме «подвисания» с повышением скорости газа нарушается плавное течение пленки жидкости, появляются завихрения, брызги, увеличивается смоченная поверхность насадки и, соответственно, интенсивность процесса массопередачи. Этот режим заканчивается в точке *B*.

Третий режим – режим «эмульгирования». Этот режим возникает в случае, когда скорость воздуха выше скорости для точки *B*. В результате происходит накопление жидкости в свободном объеме насадки до тех пор, пока сила трения между стекающей жидкостью и потоком воздуха не уравновесит силу тяжести жидкости, находящейся в насадке. При этом образуется газожидкостная дисперсная система, по внешнему виду напоминающая барботажный слой (пену) или газожидкостную эмульсию. На графике (рис. 1.3.1) этому режиму соответствует участок BC.

1.4. Основные направления интенсификации процесса испарительного охлаждения

Совершенствование конструкций насадок с пленочным режимом течения идет по пути турбулизации пленки жидкости [5]. Интенсификация охлаждающей способности насадок пленочного типа может быть осуществлена путем использования таких приемов, как создание шероховатой, перфорированной или волнистой поверхности, подбор оптимального числа и формы волн, а также устройство разрывов по ходу движения воды и воздуха, обеспечивающих чередование капельных и пленочных режимов движения воды и за счет этого перераспределение и дополнительную турбулизацию взаимодействующих потоков и повышение тепломассообмена. Наибольший эффект интенсификации охлаждения достигается за счет комбинирования указанных выше приемов [5].

Например, сочетание в конструкции пористой поверхности с подбором оптимального числа и формы волн увеличивает эффективность охлаждения в 2,7 раза по сравнению с насадкой из гладких плоских листов.

Устройством волн на гладких листах в зависимости от их направления можно увеличить эффективность охлаждения в 1,8 раза. Дальнейшая интенсификация может быть осуществлена путем создания на волнах-гофрах канавок, насечек и отверстий, способствующих замедлению движения пленки по поверхности листов, увеличению ее растекания и усилению турбулизации. Число, форма и размеры отверстий должны быть оптимизированы. Этими способами можно достичь увеличения эффективности охлаждения в 2,4 раза [5].

Заслуживают внимания такие варианты конструкций регулярных насадок, где обеспечивается постоянное перераспределение потоков. Значительная интенсификация охлаждающего эффекта за счет дополнительной турбулизации потоков воды и воздуха, лучшего их перераспределения и перемешивания согласно ряду экспериментов различных исследователей может быть достигнута путем разрыва сплошных листов по высоте. Также при рациональном размещении разрывов можно при равной охлаждающей способности добиться значительного уменьшения количества материала. Экономия материалов на устройство насадки при этом может достигать 30% без какого-либо ущерба для охлаждающей способности насадки [5]. Предлагаемые направления интенсификации подтверждают и наметившуюся тенденцию к уменьшению высоты блоков насадки.

Использование разрывов и уменьшение высоты блоков насадки приводит к увеличению числа входных и выходных участков, в которых процессы тепломассообмена между водой и воздухом протекают наиболее интенсивно за счет перемешивания контактирующих сред и более высокой разности их температур [5]. Устройство разрывов по высоте в насадках, состоящих из решетчатых пластмассовых элементов, малоэффективно. Увеличение охлаждающей способности насадок обычно сопровождается увеличением их аэродинамических сопротивлений, что, как правило, считается нежелательным. Однако этого не всегда следует опасаться, так как для обеспечения равномерного и полного растека-

ния потока воздуха по сечению насадки он должен обладать определенным сопротивлением. Поэтому для окончательной оценки эффективности и рациональности применения конкретной насадки целесообразно проводить расчеты с учетом всех влияющих факторов. Основными из них являются охлаждающая способность и гидравлическое сопротивление насадки.

1.5. Примеры конструкций современных насадок для оросителей градирен

Факторами, определяющими выбор насадки, являются характеристики теплопередачи, потери давления, общая стоимость и надежность. Надежность, включая доступность ремонта, является особенно важным фактором для тепловых электростанций и в других областях использования, где стоимость градирни составляет очень малую часть всех затрат, а выведение градирни в ремонт – большую. Очевидно, предпочтительно применять насадку с самой низкой стоимостью, лучшей характеристикой теплопередачи и более низкими потерями давления. Но проблема выбора затрудняется, если насадка является лучшей по одному или двум показателем и худшей по основным.

В зависимости от преобладающего типа теплообменной поверхности все разновидности насадок для оросителей градирен можно разделить на пленочные, капельно-пленочные и капельные, примеры их конструкций приведены на рис. 1.5.1–1.5.4.

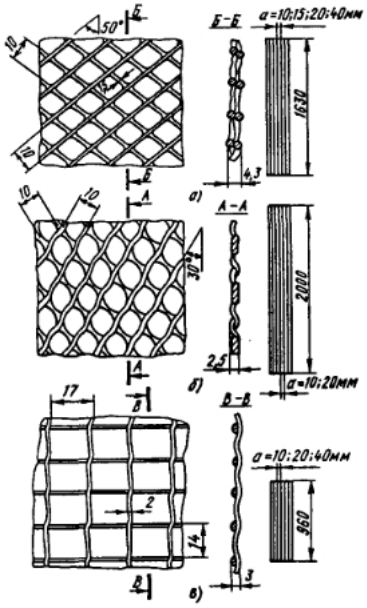
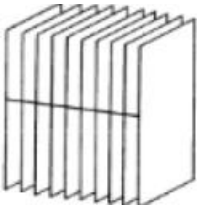
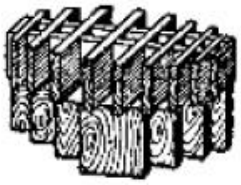


Рис. 1.5.1. Схемы оросителей из плоских сеток различных марок [15]



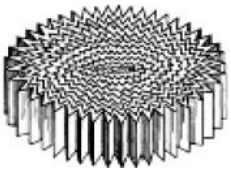
Плоско-параллельная насадка



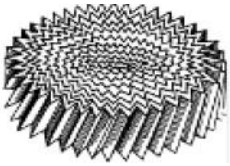
Хордовая насадка



Кольца Рашига «в укладку»



Рулонная с прямым гофром



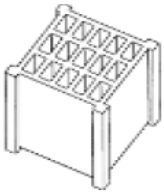
Рулонная с косым гофром



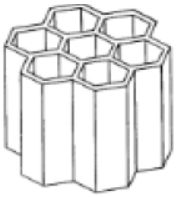
«зиг-заг»



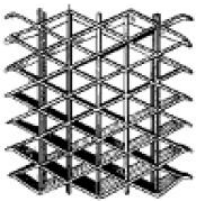
Блочная щелевая



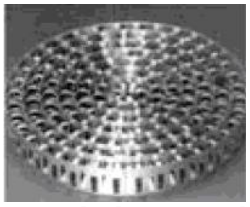
Блочная решетчатая



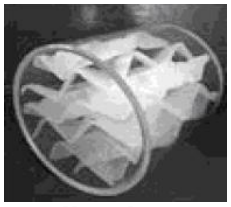
Блочная сотовая



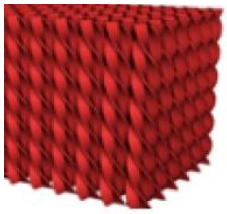
Стрейпак



Fi-Pak sheet metal



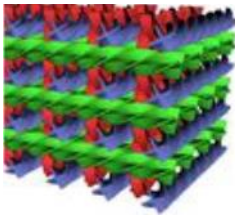
Mellapak 250Y Type Y plastic



PN-1D plastic



Пакетная вихревая насадка



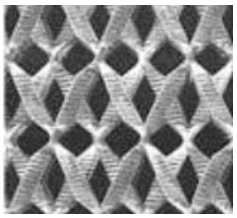
PN-3D plastic



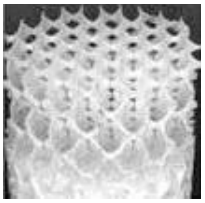
Регулярная массообменная насадка фирмы «Anser»



Flexipacs



Rombopak metal



Euroform plastic



2SP



Impuls packing ceramica

Рис. 1.5.2. Общий вид и структура некоторых типов регулярных насадок

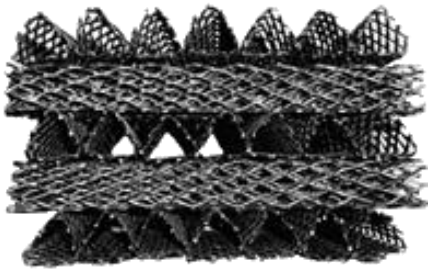


Рис. 1.5.3. Блок из призм ПР-50

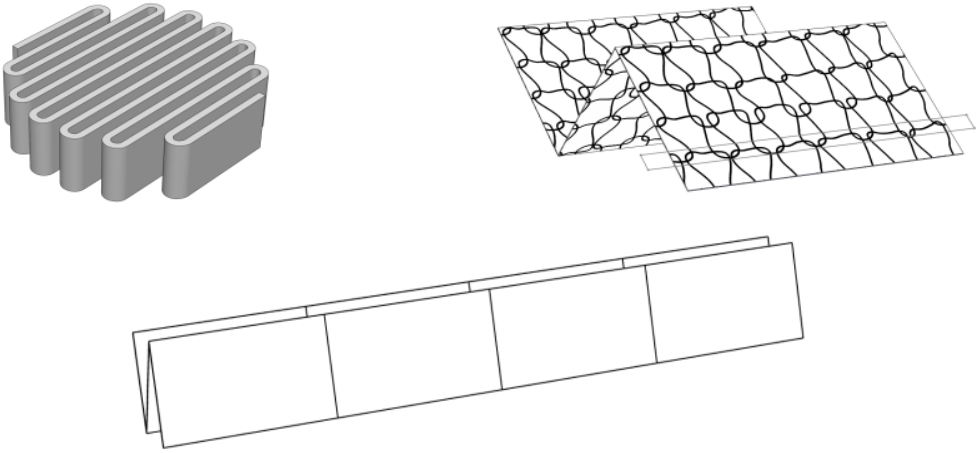


Рис. 1.5.4. Регулярная сетчатая насадка для градирни [8]

Принято считать, что лучшими теплообменными характеристиками обладают оросители пленочного типа. Вместе с тем, их слабым местом является относительно высокая чувствительность к наличию в оборотной воде различных химических и механических примесей [15]. При наличии в оборотной воде жиров, нефтепродуктов и взвесей с концентрацией 25–150 мг/л рекомендуется применять капельные и пленочно-капельные типы оросителей [15].

К основным геометрическим характеристикам насадок относятся:

1) удельная поверхность a;

2) свободный объем ε;

3) эквивалентный диаметр $d_{экв}$.

Удельная поверхность – суммарная поверхность насадочных тел в единице занимаемого насадкой объема. Удельная поверхность обычно обозначается буквой a и измеряется в $м^2/м^3$. Чем больше величина удельной поверхности насадки, тем, как правило,

выше эффективность насадочного аппарата, но ниже производительность и больше гидравлическое сопротивление.

Свободный объем – доля пустот между насадочными телами в единице объема, занимаемого насадкой. Свободный объем слоя насадки обозначается ε и измеряется в $м^3/м^3$. Чем больше свободный объем насадки, тем выше ее производительность и меньше гидравлическое сопротивление, однако при этом снижается эффективность работы насадки.

Эквивалентный диаметр канала слоя насадки (гидравлический радиус) $d_{экв}$ измеряется в метрах и определяется по формуле:

$$d_{экв} = \frac{4\varepsilon}{a}. \qquad (1.5.1)$$

Являясь характерным гидродинамическим размером насадки, этот параметр часто используется при расчетах тепло- и массообменной аппаратуры.

В решетчатых насадках поверхность охлаждения складывается из поверхности пленок, стекающих по перемычкам решетки, и поверхности капель, срывающихся с них и падающих вниз при многократном дроблении. При этом поверхность охлаждения непрерывно обновляется и турбулизируется потоком воздуха с возможностью свободного перераспределения контактирующих сред в объемной решетчатой структуре, что интенсифицирует процесс испарения (охлаждения) воды.

Контрольные вопросы

1. Виды градирен в системах оборотного водоснабжения?
2. Какие градирни являются наиболее эффективными с технической точки зрения?
3. За счёт чего происходит охлаждение оборотной воды в градирне?
4. От чего зависит степень охлаждения воды в градирне?
5. Достоинства и недостатки нагнетательных и всасывающих вентиляторов градирен?
6. Что является движущей силой процесса испарения воды в градирне?
7. Основные параметры, характеризующие состояние влажного воздуха?
8. Как записывается материальный баланс (баланс влаги) градирни?
9. Как записывается баланс теплоты, отдаваемой в градирне водой и воспринимаемой воздухом?

10. Что такое число Меркеля, в каких случаях его целесообразно использовать?
11. Гидродинамические режимы капельно-плёночных насадок?
12. Пути совершенствования конструкций насадок с пленочным режимом течения?
13. Примеры конструкций насадок оросителей градирен?
14. Что такое удельная поверхности насадки?
15. Что такое свободный объём насадки?
16. Как описать зависимость для определения эквивалентного диаметра насадки через удельную поверхность и свободный объём?

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УКЛАДКИ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ НАСАДОК

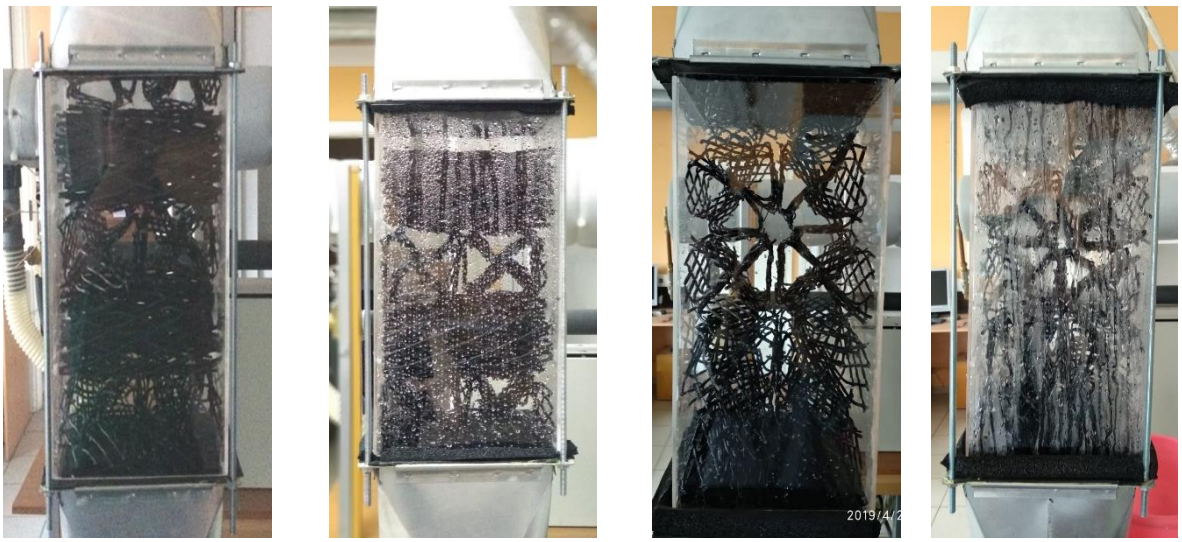
Как показали анализ литературы и проведенные эксперименты, призматическая решетчатая полимерная регулярная насадка удовлетворяет каждому из вышеуказанных технологических требований, поэтому ее можно рекомендовать для широкого и эффективного использования в различных отраслях промышленности.

В работе [1] представлены результаты опытов по исследованию гидравлических и тепломассообменных характеристик призматической регулярной насадки с решетчатой поверхностью, выполненной из полиэтилена низкого давления (высокой плотности). Сама призматическая насадка с решетчатой поверхностью была запатентована в 1993 году [2] и успешно эксплуатируется на различных промышленных предприятиях, начиная от градирен для процессов испарительного охлаждения [3, 4], вплоть до установок очистки отходящих газовоздушных выбросов, а также при проведении биологической очистки газа в биофильтрах [5].

На рис. 2.1 представлены варианты укладки насадки в пространстве для проведения опытов по исследованию их гидравлического сопротивления и тепломассообменных характеристик с целью определения наиболее рациональной конструкции с точки зрения максимальной эффективности тепломассобменных процессов и процесса пылеулавливания при минимально возможном гидравлическом сопротивлении.

Опыты проводились на экспериментальной установке, которая представляла собой насадочную колонну квадратного сечения размерами 0,2 х 0,2 м. Экспериментальная установка могла работать в двух режимах: 1) подача только воздуха (сухая колонна); 2) противоточная подача воздуха и воды (орошаемая колонна).

Способ укладки №1 *Способ укладки №2*



а *б* *а* *б*

Способ укладки №3 *Способ укладки №4*



а *Б* *а* *б*

Рис. 2.1. Исследуемые варианты укладки регулярной призматической насадки в пространстве:
а – сухая насадка; б – орошаемая насадка

Опыты для орошаемой насадки проводились при четырех различных расходах по жидкости $G_ж$: 400, 500, 600 и 750 кг/ч. Таким образом, объемный расход воды Q и плотность орошения $q_{орош.}$ составляли 0,40, 0,50, 0,60, 0,75 м³/ч и 10,02, 12,53, 15,03, 18,79 м³/(м²·ч), соответственно. Высота слоя насадки составляла 1 метр (H = 1 м).

По полученным данным были построены графики зависимостей гидравлического сопротивления насадки от скорости потока воздуха, изображенные на рис. 2.2.

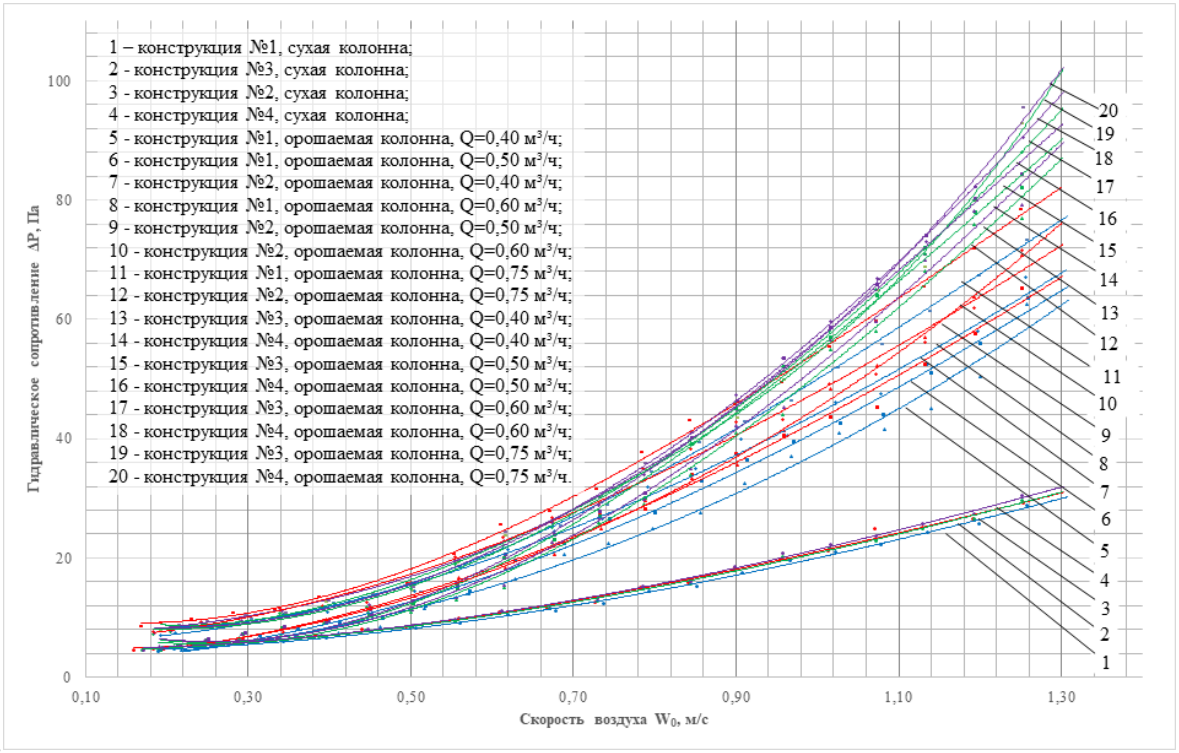


Рис. 2.2. Графики зависимости гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки от скорости потока воздуха

Из рис. 2.2 следует, что минимальным гидравлическим сопротивлением обладает способ укладки насадки №1, при этом варианте укладки призматической насадки в аппарате удельная поверхность a = 166,40 м^2/м^3; порозность ε = 0,749; эквивалентный диаметр $d_{экв.}$ = 0,018 м.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки рассчитывают по следующей формуле [6]:

$$\Delta P_{сух} = \xi_{сух} \cdot \frac{H}{d_{экв}} \cdot \frac{\rho_г \cdot W^2}{2}, \qquad (2.1)$$

где $\Delta P_{сух}$ – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па; $\xi_{сух}$ – коэффициент гидравлического сопротивления сухой насадки; H – высота слоя насадки, м; $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр насадки, м; $\rho_г$ – плотность газа, кг/м^3; W – действительная скорость газа, м/с.

Выражая действительную скорость газа W через приведенную скорость W_0 в свободном сечении колонны и порозность насадки ε, как $W = W_0/\varepsilon$, и с учетом $d_{экв} = 4 \cdot \varepsilon / a$, получим выражение (2.2) для потери давления на 1 м высоты насадки:

$$\frac{\Delta P_{сух}}{H} = \xi_{сух} \cdot \frac{W_0^{\,2} \cdot \rho_г \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \qquad (2.2)$$

Общий вид формулы для определения коэффициента гидравлического сопротивления сухой насадки выглядит следующим образом:

$$\xi_{сух} = K_{\xi сух}/(\mathrm{Re}^n), \qquad (2.3)$$

где коэффициенты $K_{\xi сух}$ и n определяются на основе опытных данных.

Аналогичная формула используется для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки. Потери давления в слое орошаемой насадки $\Delta P_{орош}$ определяются по зависимости аналогичной (2.2) с заменой $\xi_{сух}$ на коэффициент гидравлического сопротивления орошаемой насадки $\xi_{орош}$, который зависит от коэффициента $\xi_{сух}$ и плотности орошения:

$$\xi_{орош} = \xi_{сух} + N_{\xi орош} \cdot q_{орош}, \qquad (2.4)$$

где $N_{\xi орош} \cdot q_{орош}$ – коэффициент, учитывающий влияние плотности орошения на гидравлического сопротивления насадки, (м²·ч)/м³, который находится из опытных данных; $q_{орош}$ – плотность орошения, м³/(м²·ч).

Для наиболее рационального способа укладки призматической насадки №1 были получены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки. На рис. 2.3 представлен график зависимости коэффициента гидравлического сопротивления сухой насадки от критерия Рейнольдса $\xi_{сух} = f(\mathrm{Re})$ в логарифмической сетке.

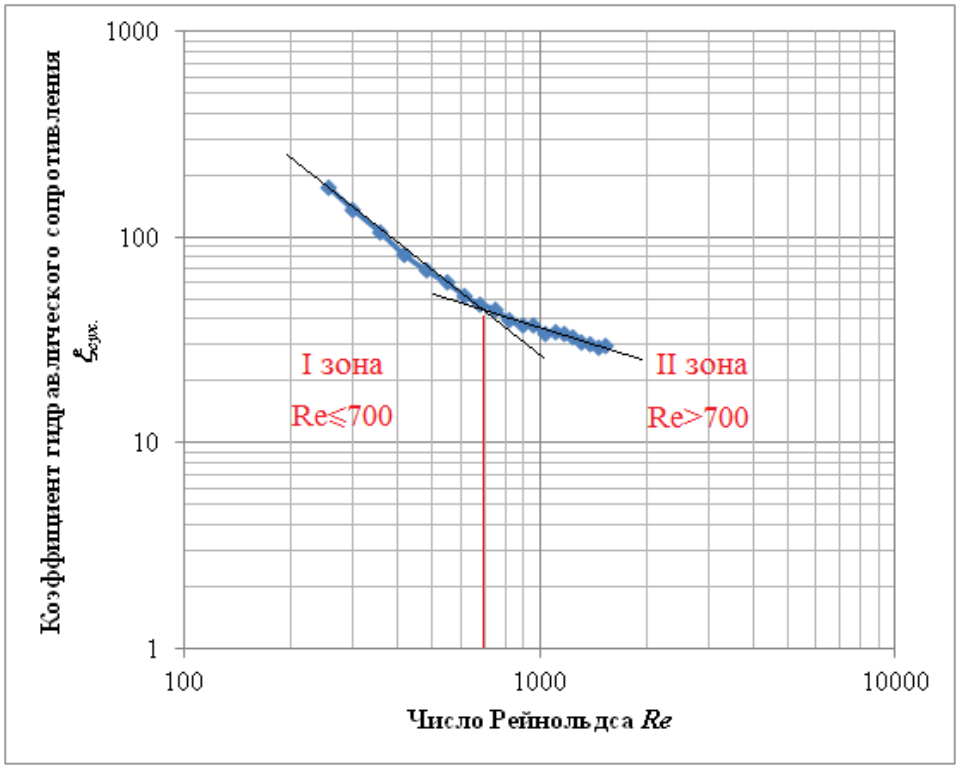


Рис. 2.3. График зависимости коэффициента гидравлического сопротивления сухой насадки, уложенной по способу №1, от критерия Рейнольдса

Из графика (рис. 2.3) получили уравнения (2.5 и 2.6) для определения значений коэффициентов гидравлического сопротивления сухой насадки при Re≤700 и Re>700, соответственно.

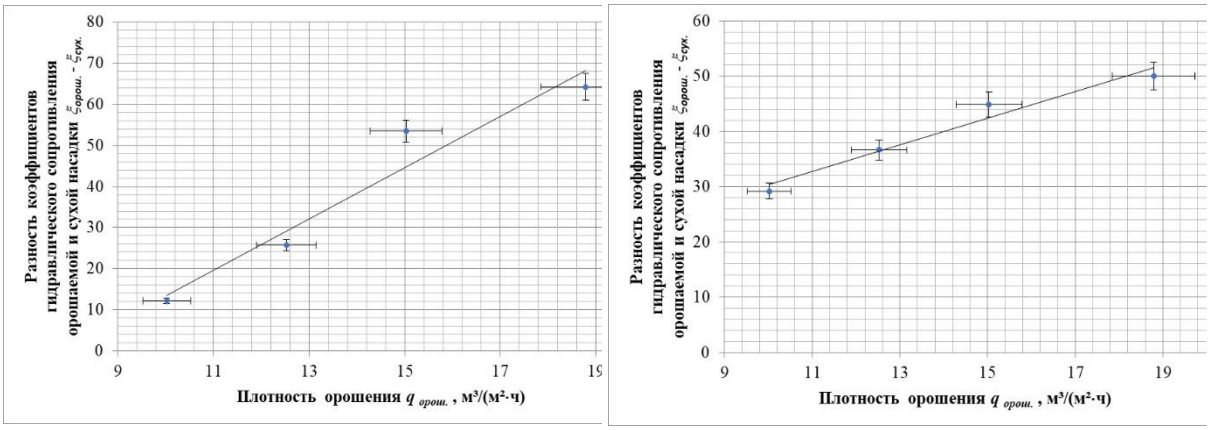
$$\xi_{сух} = 2{,}37/(\mathrm{Re}^{0.34}), \qquad (2.5)$$

$$\xi_{сух} = 1{,}76/(\mathrm{Re}^{0.02}), \qquad (2.6)$$

где $\mathrm{Re} = \dfrac{4 \cdot W_0}{a \cdot \nu_2}$ [6], так как $d_{экв} = \dfrac{4\varepsilon}{a}$, формула (1.5.1), а $W = W_0/\varepsilon$.

Re – критерий Рейнольдса; $\nu_г$ – кинематическая вязкость газа, $м^2/с$.

Определив разницу опытных значений коэффициентов гидравлического сопротивления орошаемой и сухой насадки, зная площадь сечения колонны и плотность орошения жидкости, построили графики зависимостей $\xi_{орош} - \xi_{сух} = f(q_{орош})$, изображенные на рис. 2.4.



а *б*

Рис. 2.4. График зависимости разности коэффициентов гидравлического сопротивления орошаемой и сухой насадки от плотности орошения (с доверительным интервалом для точек):
а – для скорости воздуха в колонне W_0 = 0,4 м/с при Re≤700;
б – для скорости воздуха в колонне W_0 = 0,91 м/с при Re>700

Таким образом, аппроксимировав прямой линией полученные точки графиков зависимостей, изображенных на рисунке 2.4, получили уравнения (2.7) и (2.8) для расчета гидравлического сопротивления орошаемой укладки насадки по способу №1 при Re≤700 и Re>700, соответственно.

$$\xi_{орош} = \xi_{сух} + 48{,}92 \cdot q_{орош} \quad (2.7)$$

$$\xi_{орош} = \xi_{сух} + 6{,}28 \cdot q_{орош} \quad (2.8)$$

Для каждого из исследуемых способов укладки насадки в пространстве №1–4 были построены графики зависимостей объемных коэффициентов массоотдачи от скорости воздуха при различных расходах по жидкости (рис. 2.5).

Из графиков на рис. 2.5 видно, что объемные коэффициенты массоотдачи увеличиваются с увеличением скорости воздуха и увеличением плотности орошения. Максимальные значения объемных коэффициентов массоотдачи выявлены у способа укладки насадки № 1.

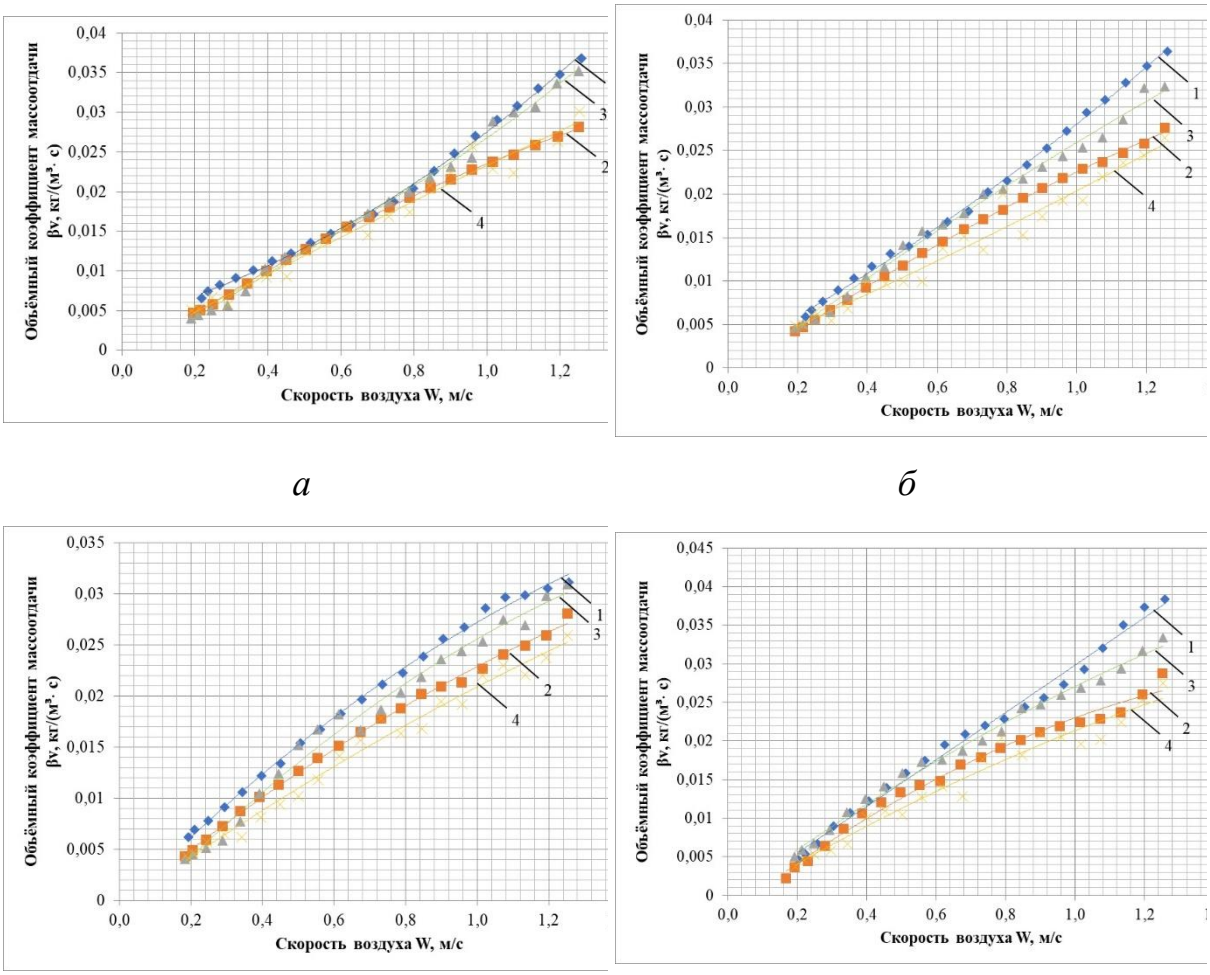


Рис. 2.5. Графики зависимостей объемных коэффициентов массоотдачи от скорости воздуха при различных расходах по жидкости: а – расход по жидкости Q = 0,40 м³/ч; б – расход по жидкости Q = 0,50 м³/ч; в – расход по жидкости Q = 0,60 м³/ч; г – расход по жидкости Q = 0,75 м³/ч; 1 – способ укладки № 1; 2 – способ укладки № 2; 3 – способ укладки № 3; 4 – способ укладки № 4;

В результате традиционной обработки экспериментальных данных [8], представленных на рис. 2.5, получена эмпирическая зависимость для расчета объемного коэффициента массоотдачи способа укладки насадки № 1:

$$\beta_v = 0.55 \cdot \lambda^{0.80} G_{ж}, \text{ кг/(м}^3\cdot\text{ч)}, \qquad (2.9)$$

где $\lambda = G_в/G_ж$ – отношение удельного массового расхода воздуха к удельному массовому расходу воды.

Применительно к градирням, объемный коэффициент теплоотдачи связан с объемным коэффициентом массоотдачи известным соотношением (число Льюиса) [9]:

$$\alpha_v = 1{,}65\ \beta_v \qquad (2.8)$$

Таким образом полученную зависимость (2.7) можно использовать при расчете процесса испарительного охлаждения в градирнях.

Результаты исследования могут быть использованы на предприятиях, где применяются градирни различного типа или аппараты для проведения массообменных процессов, например абсорбции, а также при разработке насадочных скрубберов.

Контрольные вопросы

1. Устройство экспериментальной установки для исследования характеристик призматической решетчатой полимерной насадки.
2. Как определяется гидравлическое сопротивление сухой насадки?
3. Общий вид зависимости для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления сухой насадки.
4. Как определяются потери давления в слое орошаемой насадки?
5. Как определяется коэффициент гидравлического сопротивления орошаемой насадки?
6. Как рассчитывается объёмный коэффициент массопередачи?
7. Как рассчитывается объёмный коэффициент теплопередачи в градирнях?

ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРОТКОСЛОЕВОЙ НАСАДКИ ГРАДИРЕН

3.1. Регулярная насадка с косыми гофрами

Среди насадок пленочного типа эффективны регулярные насадки с косыми гофрами, имеющие высокоразвитую структурированную поверхность [1, 2]. Исследованию различных аспектов эффективности регулярных насадок пленочного типа посвящено значительное число работ. Вместе с тем влияние высоты промышленных насадок пленочного типа на эффективность охлаждения оборотной воды изучено недостаточно. К эффективным методам совершенствования конструкций регулярных насадок с пленочным режимом течения относится турбулизация и разрыв пленки стекающей жидкости, а также постоянное перераспределение контактирующих потоков «газ-жидкость». Короткослоевая насадка обеспечивает постоянное обновление пленки жидкости, увеличение числа «концевых эффектов», в которых процессы тепломассообмена между водой и воздухом протекают наиболее интенсивно за счет эффективного перемешивания контактирующих потоков.

В настоящее время наиболее распространенными типами регулярных насадок являются полимерные насадки из вертикальных гофрированных пластин с разной высотой гофра. Например, фирма «CHLADICI VEGE Praha a.s.» производит насадки следующих типов «19», «19,5», «22,5», «23,5», «30», «40 + 6» [3] с соответствующими высотами гофр. Наибольшую удельную поверхность обеспечивает насадка с меньшей высотой гофр. Поскольку наименьшую высоту гофр из данного ряда насадок имеет насадка типа «19», то именно она была принята в качестве базовой для настоящего исследования.

При разработке новой короткослоевой насадки за основу была принята насадка типа «19» пленочного типа фирмы «CHLADICI VEGE Praha a.s.», испытанная во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [4]. По высоте базовая насадка состоит из ярусов одной конструкции высотой 0,3 и 0,61 м. Блоки базовой насадки изготовлены из вертикальных полипропиленовых листов двойного гофрирования, путем их встречной укладки и сваривания между собой в местах пересечения вершин трапециевидных гофр (рис. 3.1.1).

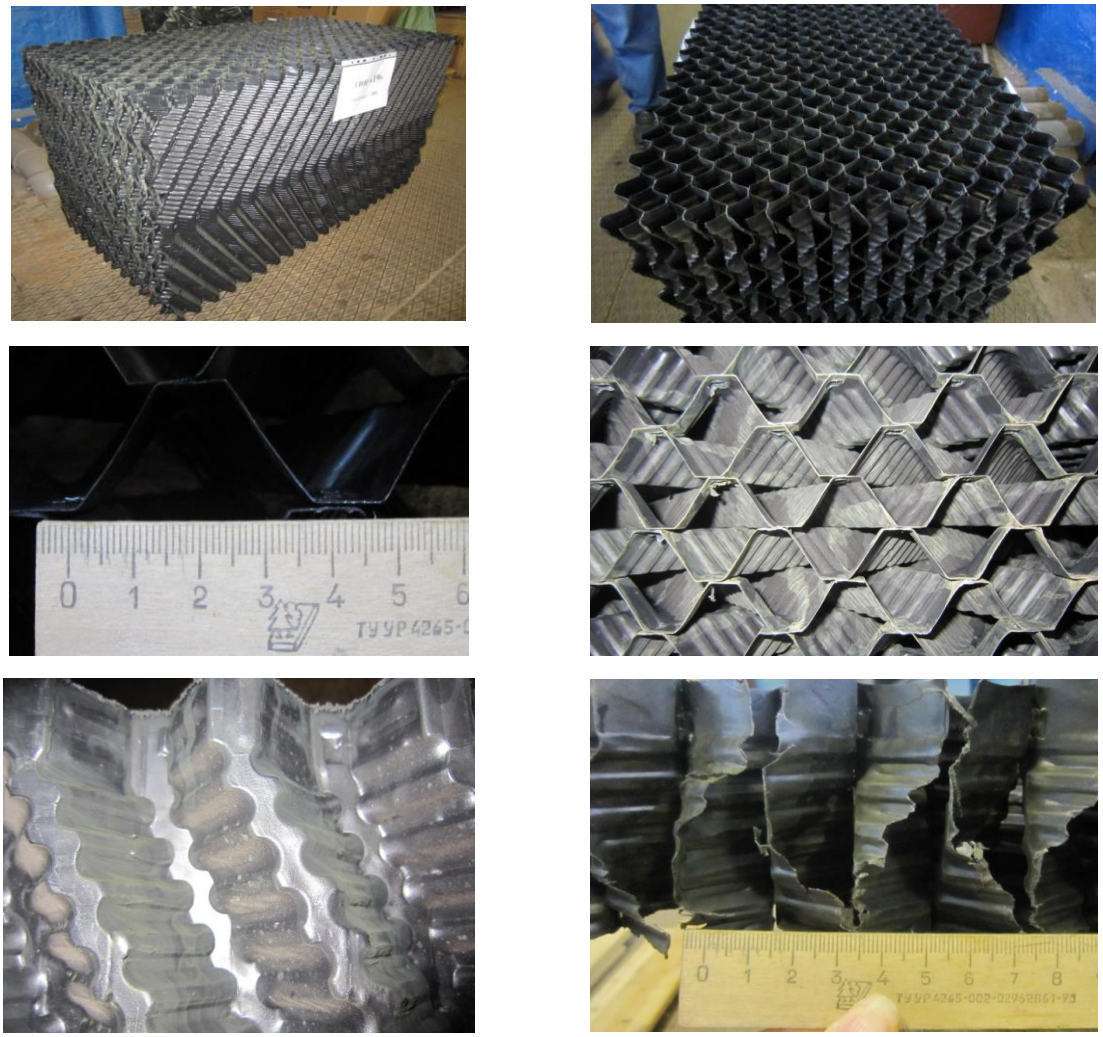
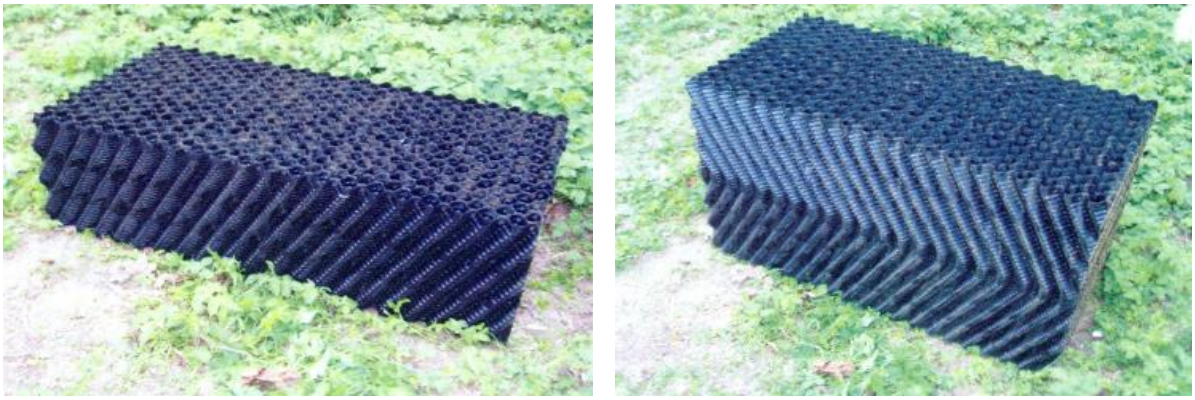


Рис. 3.1.1. Базовая регулярная насадка пленочного типа «19» фирмы CHLADICI VEGE Praha a.s.

Основная трапециевидная гофра листа блока насадки имеет угол наклона к горизонту 60°, высоту гребня 19 мм и основание 38 мм. Один ярус насадки высотой H = 0,3 и 0,61 м (рис. 3.1.2) и состоит из 25 гофрированных листов. По высоте блока базовой насадки ярусы укладывались непосредственно друг на друга с сохранением направления гофр в смежных по высоте ярусах (рис. 3.1.3). Масса блока размерами 1,0×0,51×0,61 м – 6,6 кг, размерами 1,0×0,51×0,3 м – 3,25 кг. Блок трехъярусной насадки общей высотой H = 1,52 м состоит из трех ярусов одной конструкции: два яруса высотой по 0,61 м и верхний третий ярус высотой 0,3 м. Блок насадки общей высотой 1,83 м состоит из трех ярусов одной конструкции высотой по 0,61 м каждый. Блок двухъярусной насадки общей высотой H = 1,22 м состоит из двух ярусов одной конструкции высотой по 0,61 м каждый. Блок двухъярусной насадки общей

высотой H = 0,91 м состоит из двух ярусов одной конструкции: блока высотой 0,61 м и верхнего второго яруса высотой 0,3 м. Удельная поверхность насадки $a_{уд}$ = 152 м^2/м^3, порозность ε = 0,97 м^3/м^3. Блок базовой насадки типа «19» размерами 1,0×0,51×0,61 м показан на рис. 3.1.1.



а) *б)*

Рис. 3.1.2. Блоки базовой насадки типа «19»:
а) блок насадки высотой H = 0,3 м; б) блок насадки высотой H = 0,61 м



б) *в)* *г)*

Рис. 3.1.3. Блоки базовой насадки типа «19» на опытном стенде:
а) трехъярусная насадка общей высотой H = 0,91 м; б) трехъярусная насадка общей высотой H = 1,22 м; в) двухъярусная насадка общей высотой H = 1,52 м; г) двухъярусная насадка общей высотой H = 1,83 м

Блок новой короткослоевой насадки – КСН представляет собой ярусы одинаковой высоты, расположенные с поворотом каждого последующего яруса на 90° в горизонтальной плоскости по отношению к предыдущему. Соседние по высоте ярусы располагались с разрывами при помощи дистанционирующих проставок.

Для определения наиболее эффективной высоты яруса в блоке насадки проводились три серии опытов с разрывами:

1) насадка КСН-1 состоит из трех ярусов высотой по $h = 0{,}3$ м и двух разрывов по $\delta = 0{,}03$ м каждый. Общая высота блока $H = 0{,}96$ м;
2) насадка КСН-2 состоит из шести ярусов высотой по $h = 0{,}15$ м и пяти разрывов высотой по $\delta = 0{,}03$ м. Общая высота блока $H = 1{,}05$ м;
3) насадка КСН-3 состоит из двенадцати ярусов высотой по $h = 0{,}075$ м и одиннадцати разрывов высотой по $\delta = 0{,}03$ м. Общая высота блока $H = 1{,}2$ м.

Из приведенного литературного анализа следует, что геометрический разрыв должен быть. Однако данное предположение требует экспериментального подтверждения. Поэтому для определения эффективности насадки с разрывами между ярусами исследование также проводилось на насадке без разрывов.

Насадка представляет собой блок, состоящий из ярусов одинаковой высоты, расположенных с поворотом каждого последующего яруса на 90° по отношению к предыдущему, но без разрывов соседних ярусов: насадка КСН состоит из двенадцати ярусов высотой по $h = 0{,}075$ м. Общая высота блока $H = 0{,}9$ м.

Геометрические характеристики блоков испытанных конструкций насадок КСН представлены в таблице 3.1.1. Блоки насадок КСН, установленных на опытном стенде, показаны на рис. 3.1.4.

Таблица 3.1.1

Геометрические характеристики испытанных насадок

Тип насадки	Общая высота блока, м	Высота яруса в блоке, м	Количество ярусов в блоке, шт.	Количество разрывов, шт.	Высота разрыва, м	Высота твердого тела без учета разрывов, м	Удельная поверхность блоков насадок, $м^2/м^3$
КСН-1	0,96	0,3	3	2	0,03	0,9	138,3
КСН-2	1,05	0,15	6	5	0,03	0,9	129,2
КСН-3	1,2	0,075	12	11	0,03	0,9	110,9
КСН	0,9	0,075	12	-	-	0,9	152



КСН-1 *КСН-2* *КСН-3* *КСН*

Рис. 3.1.4. Блоки новой короткослоевой насадки на опытном стенде

3.2. Стенд для проведения гидродинамических испытаний

Испытания насадок – гидродинамические и тепломассообменные – проводятся независимо друг от друга с соответствующей подготовкой экспериментального стенда и измерительной аппаратуры. Стенд находится в аттестованной испытательной лаборатории ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Измерительные приборы для экспериментальных исследований были сертифицированы и аттестованы согласно требованиям ГОСТ и технических условий.

Гидродинамические испытания проводятся с целью определения коэффициентов гидродинамического сопротивления насадок в зависимости от расхода воды (плотности орошения) и расхода воздуха (скорости воздушного потока). Конечной целью является определение коэффициента гидродинамического сопротивления насадок в автомодельной области и его зависимости от расхода (плотности орошения) воды.

Стенд состоит из следующих основных элементов (рис. 3.2.1). Шахта вертикальная (4) общей высотой 5,3 м. Боковые стенки шахты обшиты шпунтованными досками с антисептическим покрытием. Лицевая и задняя сторона шахты выполнены из оргстекла, что позволяет вести визуальное наблюдение и контролировать процесс распределения воды в элементах насадок (5). Шахта состоит из: верхней секции, где размещается водоуловительное устройство (2) и водораспределительная система (3); рабочей секции для установки элементов испытуемых оросительных устройств

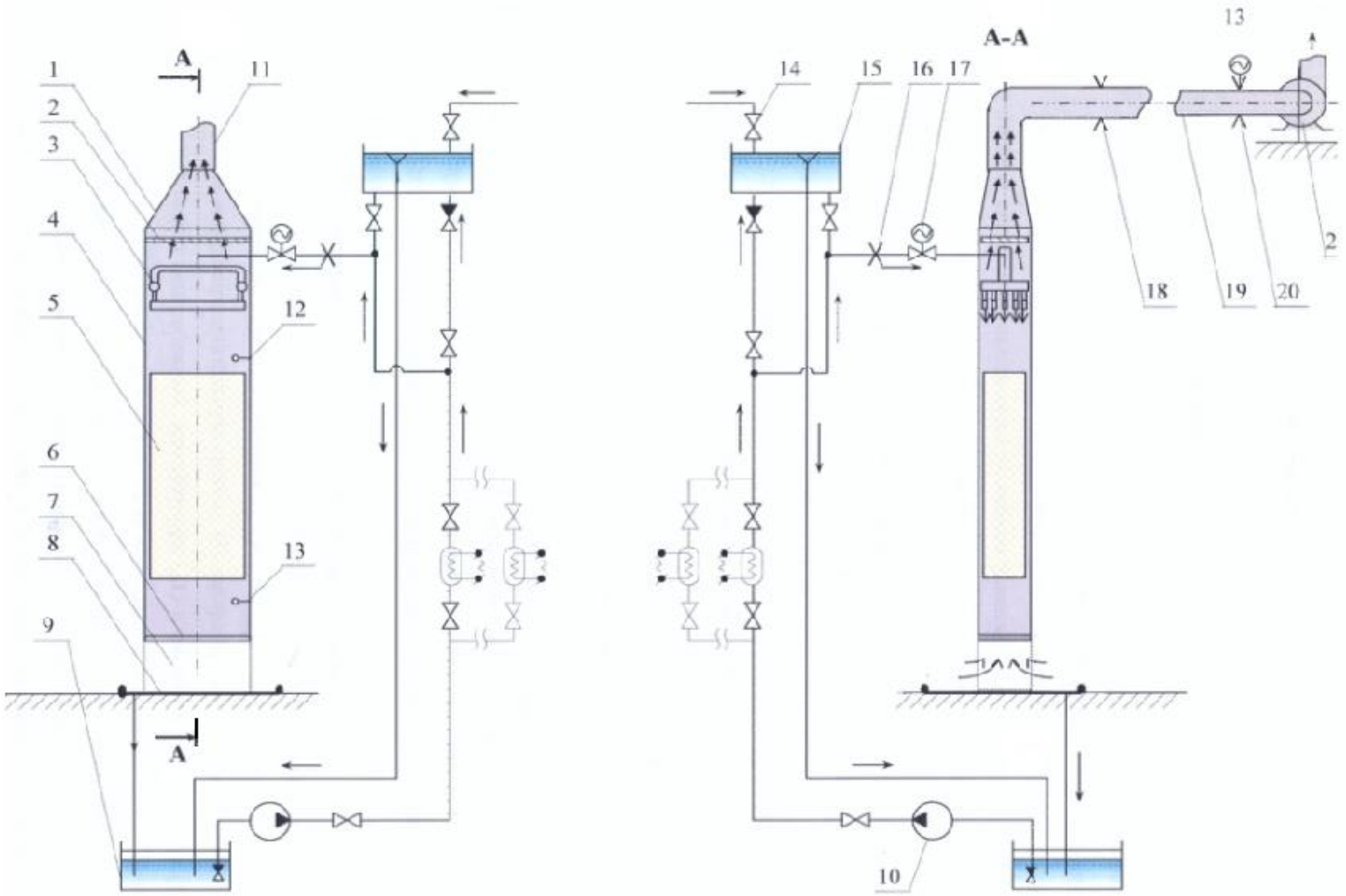


Рис. 3.2.1. Стенд для гидродинамических испытаний (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева)

высотой 2,5 м, шириной 1,0 м и глубиной 0,5 м (площадь орошения 0,5 м^2) и пьезометрической трубки (12); нижней секции, служащей для установки воздуховыравнивающей решетки (6) и пьезометрической трубки (13). Для перехода от прямоугольного сечения верхней секции к воздуховоду служит конфузор (1), который обеспечивает выравнивание скорости воздушного потока по сечению шахты.

Водоподводящая система стенда служит для организации водооборотного цикла и установки первичного преобразователя расхода (16). Она состоит из: приямка холодной воды (9), циркуляционного насоса (10), напорных трубопроводов, запорной арматуры, крана добавочной воды (14) и напорного бака холодной воды (15). На водоподводящем трубопроводе установлен регулировочный затвор (17), позволяющий плавно менять расход воды, подаваемой на испытательный стенд.Водораспределительная система стенда напорного типа служит для распределения воды по площади орошения рабочей секции. По трубе диаметром 50 мм вода подводится к центральной части площади водораспределения, откуда по двум коленам распределяется к магистральным трубопроводам, имеющим ряд водовыпускных патрубков. Конечные элементы рабочей водораспределительной системы изготовлены из медных трубок со штуцерами для подвода воды от магистральных трубопроводов. Каждая трубка имеет два ряда водовыпускных отверстий и закрыта специальным кожухом, выполненным из оцинкованного листа железа. Кожух позволяет организовать локальное распределение воды и исключить влияние соседних водораспределительных элементов друг на друга. Подвод воды от магистральных трубопроводов к конечным элементам водораспределительной системы осуществляется по гибким шлангам. Магистральный трубопровод с конечными элементами водораспределительной системы может перемещаться по высоте рабочей секции шахты.

Водосборная система стенда предназначена для сбора воды, стекающей с насадки (5) и отвода в приямок холодной воды (9). Она состоит из приемного бассейна холодной воды (8) и отводящего канала.

Воздухоотводящая система служит для создания направленного восходящего воздушного потока в рабочей секции испытательного стенда. Она состоит из центробежного вентилятора (21) и воздуховодов (11) и (19). Для измерения расхода воздуха в отводящем воздуховоде (11) установлена нормальная диафрагма (18), а плавное

изменение расхода воздуха осуществляется с помощью шиберной заслонки (20), установленной в воздуховоде (19).

Водоуловительное устройство (2) улавливает капельный вынос в восходящем воздушном потоке и предохраняет от излишней влаги измерительную диафрагму (18). Водоуловительное устройство представляет собой блок водоуловительного устройства типа ВУП-60/120 (ТУ 2291-003-31098323-2001), собранный из уголковых перекрестно-гофрированных поливинилхлоридных (ПВХ) элементов.

Ниже описана работа стенда для проведения гидродинамических испытаний.

На начальном этапе проведения гидродинамических испытаний насадок измерение перепада давления на насадке (5) производится без подачи расхода воды на водораспределительную систему (3) лабораторного стенда (на сухой насадке). С этой целью центробежным вентилятором (21) и системой воздуховодов (11) и (19) в шахте стенда (4) создается направленный восходящий воздушный поток. Воздух засасывается через воздуховходные окна (7), расположенные по двум широким сторонам шахты (4) (высота воздуховходных окон (7) ограничена воздуховыравнивающей решеткой (6), расположенной в нижней секции шахты, и приемным бассейном холодной воды (8)). Затем, с помощью циркуляционного насоса (10) и системы оборотного водоснабжения вода подается в напорный трубопровод и бак холодной воды (11). Вода по трубопроводу, проходя через электромагнитный преобразователь расхода (16) и регулирующий затвор (17), поступает в водораспределительную систему (3) шахты испытательного стенда. Конечные элементы водораспределительной системы относительно равномерно распределяют водный поток по площади орошения рабочей секции шахты, где установлена насадка (5). Насадка создает сопротивление восходящему воздушному потоку и с помощью пьезометрических трубок (12) и (13) электронным манометром "testo 512" производится измерение соответствующего перепада давлений. Стекающая с насадки (5) вода собирается в приемном бассейне холодной воды (8) и по отводящему каналу поступает в приямок холодной воды. Регулирование и восполнение необходимого объема циркуляционной воды в приямке холодной воды производится посредством открытия крана добавочной воды (14). Водооборотный цикл гидродинамических испытаний замыкается.

Измерение расхода воды производится с помощью первичного электромагнитного преобразователя расхода (16), установленного на прямом участке подводящего трубопровода, а значения расхода контролируются по измерительному блоку расходомера ЭРСВ-310. Изменение расхода горячей воды осуществляется на подводящем трубопроводе при помощи регулировочного затвора (17), дистанционно управляемого электроприводом типа МЭО через электронный прибор «Кристалл».

Измерение расхода воды производится с помощью первичных электроакустических преобразователей расхода (16), установленных на прямом участке подводящего трубопровода, а значения расхода контролируются по вторичному измерительному преобразователю расходомера-счетчика УРСВ "ВЗЛЕТ ПР". Изменение расхода воды осуществляется на подводящем трубопроводе при помощи регулировочного затвора (17), дистанционно управляемого электроприводом типа МЭО через электронный прибор «Кристалл».

Расход воздуха определяется по перепаду давлений на нормальной диафрагме (18), установленной в отводящем воздухо-воде (11) с помощью наклонного микроманометра ММН-240. Расход воздуха регулируется дистанционно шиберной заслонкой (20), управляемой электроприводом. Потери давления на фрагменте испытуемой насадки (5) определяются электронным манометром "testo 512".

Температура и относительная влажность входящего в шахту воздуха определяется электронным термогигрометром "testo 635" в районе расположения стенда на высоте не менее 1,5 м от пола. Барометрическое давление атмосферного воздуха определяется по показаниям барометра-анероида БАММ-1 и контролируется по данным местной метеорологической станции.

3.3. Стенд для проведения тепломассообменных испытаний

Тепломассообменные испытания проводятся с целью определения объемных коэффициентов тепло- и массоотдачи на основе комплекса полученных данных, который включает параметры проходящей через установку воды (расход, температуры горячей и охлажденной воды) и воздуха (расход, температура и относительная влажность на входе, барометрическое давление).

Стенд состоит из следующих основных элементов (рис. 3.3.1).

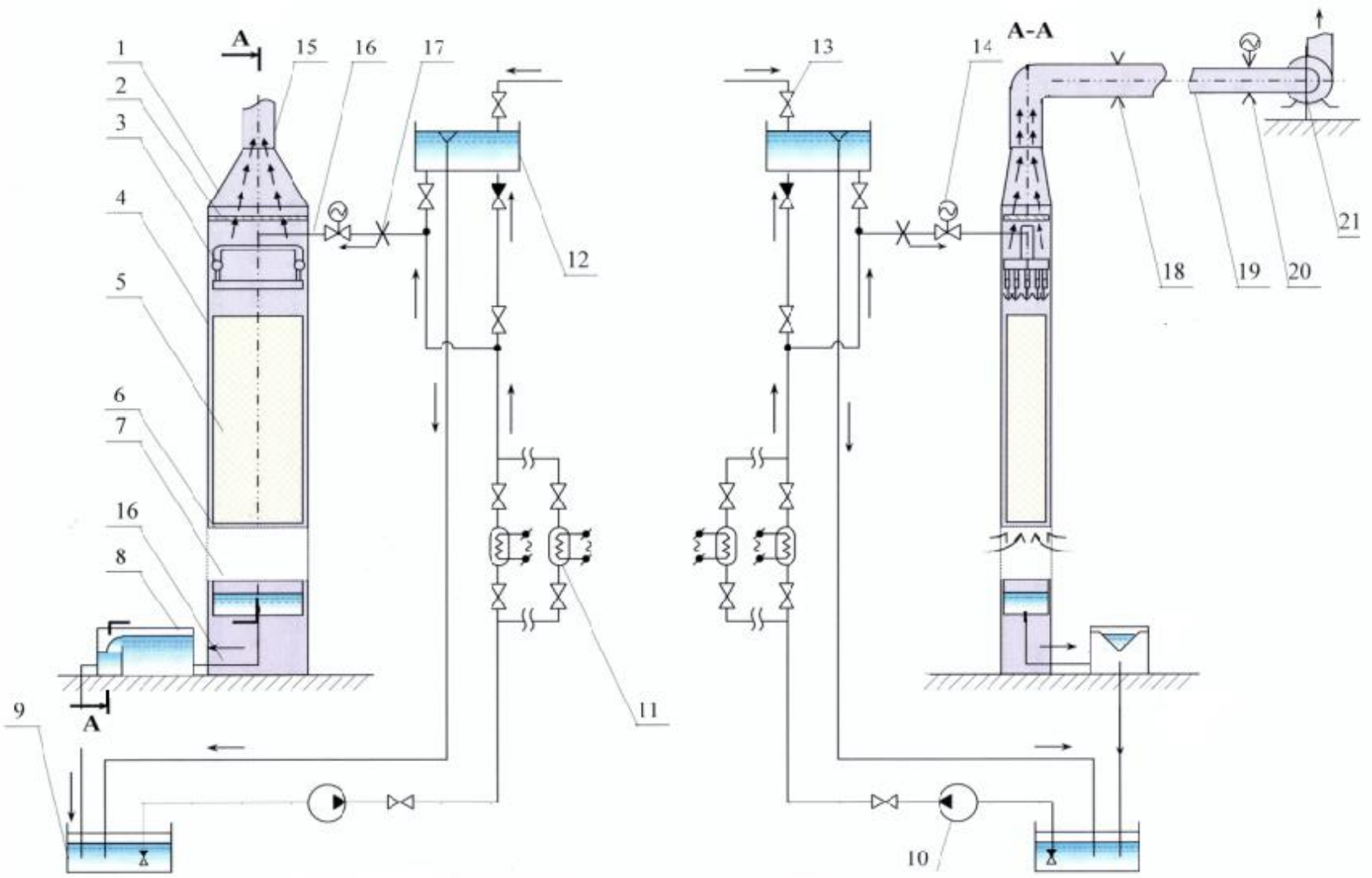


Рис. 3.3.1. Стенд для тепломассообменных испытаний (ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева)

Шахта вертикальная (4) общей высотой 5,3 м состоит из: верхней секции, где размешается водоуловительное устройство (2) и водораспределительная система (3); рабочей секции для установки насадки высотой до 2,5 м, шириной 1,0 м и глубиной 0,5 м (площадь орошения 0,5 м^2); нижней секции для сбора охлажденной воды и входа воздушного потока. Для перехода от прямоугольного сечения верхней секции к воздуховоду служит конфузор (1), который обеспечивает выравнивание скорости воздушного потока по сечению шахты. Водоподводящая система стенда служит для организации водооборотного цикла, установки первичного преобразователя расхода (17) и температурных датчиков (16). Она состоит из: приямка теплой воды (9), циркуляционного насоса (10), водонагревателей (бойлеров) (11), напорных трубопроводов, запорной арматуры, крана добавочной воды (13) и напорного бака горячей воды (12). На водоподводящем трубопроводе установлен регулировочный затвор (14), позволяющий плавно менять расход воды, подаваемой на испытательный стенд.

Водораспределительная система стенда и водоуловительное устройство (2) такие же, как и при гидродинамических испытаниях (рис. 3.3.2).

Водосборная система стенда предназначена для сбора воды, охлажденной в рабочей секции, контроля ее расхода, отвода в приямок теплой воды (9) и установки температурных датчиков (16). Она состоит из приемного бака охлажденной воды (7), мерного бака с треугольным водосливом (8) и отводящего трубопровода. Приемный и мерный баки соединены между собой гибким шлангом. Система предусматривает возможность проведения дополнительного контроля расхода воды по треугольному водосливу и на сливе в приямок теплой воды. Водонагревательная система (бойлерная установка (11)) предназначена для нагрева оборотной воды и поддержания ее рабочей температуры на необходимом уровне. Бойлерная установка состоит из трех водонагревателей мощностью по 100 кВт, параллельно подсоединенных к циркуляционной системе. Она позволяет устанавливать и поддерживать необходимый уровень нагрева воды, вести ручное и автоматическое управление процессом нагрева воды. Воздухоотводящая система служит для создания направленного восходящего потока воздуха в рабочей секции испытательного стенда. Она состоит из центробежного

вентилятора (21) и воздуховодов (15) и (19). Для измерения расхода воздуха в отводящем воздуховоде (15) установлена нормальная диафрагма (18), а плавное изменение расхода воздуха осуществляется с помощью шиберной заслонки (20), установленной в воздуховоде (19).

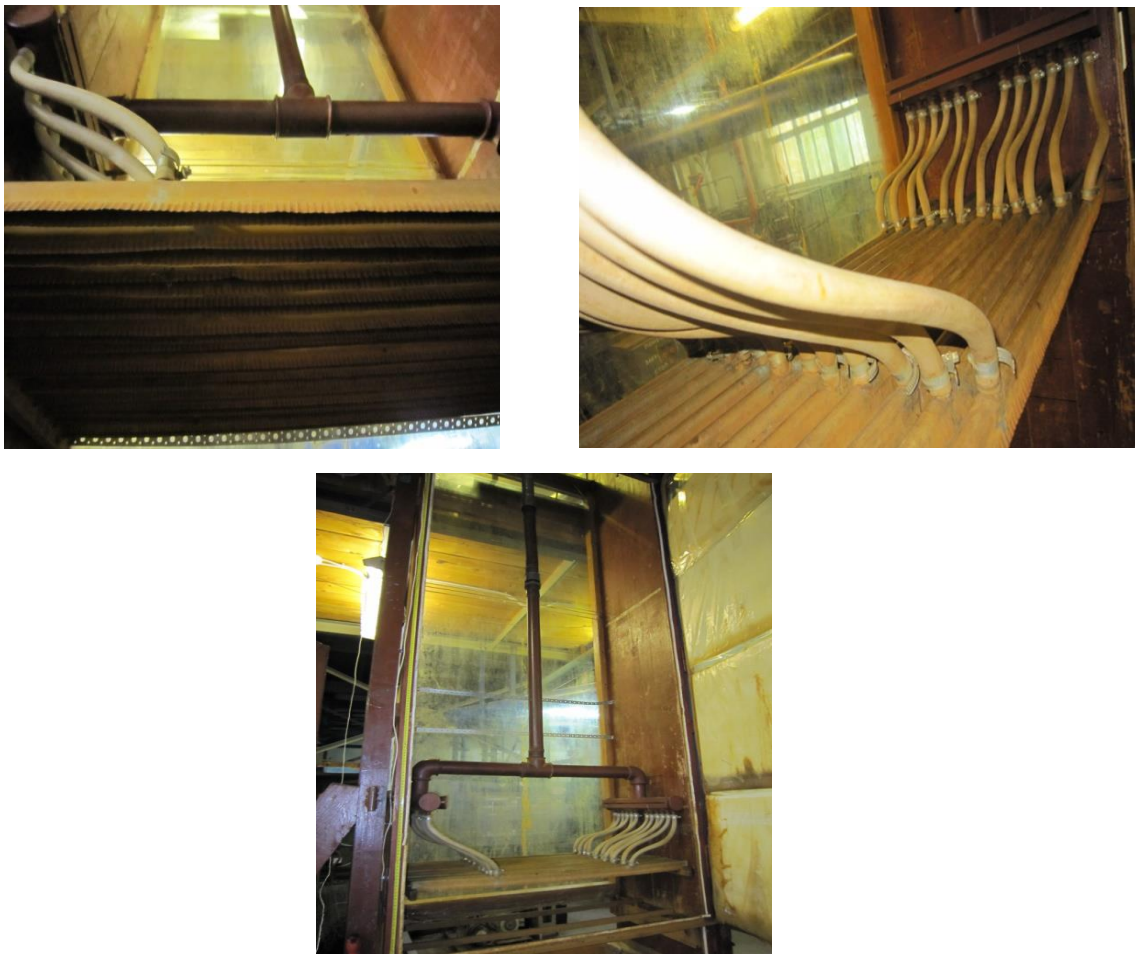


Рис. 3.3.2. Водораспределительная система

Стенд работает следующим образом.

С помощью циркуляционного насоса (10) вода подается на проточные нагревательные элементы бойлерной установки (11). Вода нагревается до необходимой температуры и подается по напорному трубопроводу, проходя через электромагнитный преобразователь расхода (17) и регулирующий затвор (14) в водораспределительную систему (3) шахты испытательного стенда и напорный бак горячей воды (12). Конечные элементы водораспределительной системы относительно равномерно распределяют водный

поток по площади орошения рабочей секции шахты, где установлен испытуемый фрагмент насадки (5). Встречный воздушный поток в шахте стенда создается центробежным вентилятором (21) и системой воздуховодов (15) и (19). Воздух засасывается через воздуховходные окна (6), расположенные по двум широким сторонам шахты, проходит через рабочую секцию с насадкой (5), водораспределительную систему (3), водоуловитель (2) и по воздуховодам выносится в атмосферу. Высота воздуховходных окон (6) ограничена нижней частью рабочей секции шахты и верхней частью водосборного бака (7). В объеме испытуемой насадки происходят наиболее интенсивные процессы тепло- и массообмена между стекающей горячей водой и проходящим навстречу ей потоком холодного воздуха. Охлажденная на насадке вода стекает в водосборный бак (7), установленный в нижней секции шахты испытательного стенда, и по гибкому шлангу поступает в мерный бак (8). Далее вода самотеком поступает в приямок теплой воды (9), откуда насосом (10) через электробойлеры (11) вновь подается в напорный подводящий трубопровод и бак горячей воды (12). Водооборотный цикл гидротермических испытаний замкнулся.

Измерение расхода воды производится с помощью первичного электромагнитного преобразователя расхода (17), установленного на прямом участке подводящего трубопровода, а значения расхода контролируются по измерительному блоку расходомера ЭРСВ-310. Также расход воды может быть проконтролирован по треугольному водосливу мерного бака (8) и на сливе в приямок теплой воды (9). Изменение расхода горячей воды осуществляется на подводящем трубопроводе при помощи регулировочного затвора (14), дистанционно управляемого электроприводом типа МЭО через электронный прибор «Кристалл».

Расход воздуха определяется по потерям давления на нормальной диафрагме (18), установленной в отводящем воздуховоде (15) с помощью наклонного микроманометра ММН-240. Расход воздуха регулируется дистанционно шиберной заслонкой (20), управляемой электроприводом.

Температура горячей и охлажденной воды измеряется цифровыми электронными термометрами ТЭТ-Ц21 с температурными

датчиками (16) – терморезисторами, установленными непосредственно в магистральном трубопроводе водораспределительной системы и в мерном баке (8).

Температура и относительная влажность входящего в шахту воздуха определяется электронным термогигрометром «testo 635»' в районе расположения стенда на высоте не менее 1,5 м от пола. Барометрическое давление атмосферного воздуха определяется по показаниям барометра анероида БАММ-1 и контролируется по данным местной метеорологической станции.

3.4. Методика обработки результатов тепломассообменных и гидродинамических испытаний насадок

3.4.1. Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи по результатам тепломассообменных испытаний

Охлаждающая способность насадок оценивается по величине объемного коэффициента массоотдачи $\beta_{рбv}$, вычисляемого по экспериментальным данным. Коэффициент $\beta_{рбv}$ зависит от параметров проведения процесса охлаждения воды и конструкции насадки (поверхности охлаждения). Обработка опытных данных проводится по методике, принятой к использованию ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Для процесса испарительного охлаждения, где происходит контакт охлаждающего воздуха с пленками, брызгами и каплями охлаждаемой воды, не существует теоретических методов расчета объемных коэффициентов массоотдачи из-за невозможности определения поверхности контакта. Поток воды состоит из пленок, брызг и капель, которые формируются в результате нескольких распадов потока и зависит от большого числа факторов (поверхностного натяжения, сил вязкости и инерции, конструктивных особенностей насадки и водораспределителя). Поэтому коэффициент $\beta_{рбv}$ определяют на основании экспериментов для каждой конструкции насадки в диапазоне рабочих скоростей воздуха и удельных гидравлических нагрузок.

Объемные коэффициенты тепло- и массоотдачи насадок определяются по результатам тепломассообменных испытаний, путем

решения обратной задачи для систем дифференциальных уравнений тепломассообмена в насадке.

В насадке возможны два режима тепломассобмена, каждому из которых соответствует своя система дифференциальных уравнений.

Режим I. Режим ненасыщенного воздуха над поверхностью охлаждения

$$dG_{ж} = \beta_{рбv}\,(p_t'' - p)/p_б\,dx \qquad \text{(a)}$$

$$c_{ж}G_{ж}dt = (\alpha_v\,(t-\theta) + r_t\,\beta_{рбv}\,(p_t'' - p)/p_б)\,dx \qquad \text{(b)} \qquad (3.4.1.1)$$

$$c_{вл}G_{в}d\theta = c_{ж}G_{ж}dt + (c_{ж}t - c_{п}\theta - r_0)\,dG_{ж} \qquad \text{(c)}$$

$$G_{в}dp = (p_б - p)^2/(0{,}622\,p_б)\,dG_{ж} \qquad \text{(d)}$$

Режим II. Режим насыщенного воздуха над поверхностью охлаждения

$$dG_{ж} = \beta_{рбv}\,(p_t'' - p_\theta'')/p_б\,dx \qquad \text{(a)}$$

$$c_{ж}G_{ж}dt = (\alpha_v\,(t-\theta) + r_t\,\beta_{рбv}\,(p_t'' - p_\theta'')/p_б)\,dx \qquad \text{(b)} \qquad (3.4.1.2)$$

$$G_{в}d\theta = (c_{ж}G_{ж}dt + c_{ж}(t-\theta)dG_{ж})/(c_{вл} + r_0\,0{,}622\,p_б\,/(p_б - p_\theta'')^2(dp''/d\theta)) \qquad \text{(c)}$$

В дифференциальных уравнениях приняты следующие условные обозначения и размерности:

x – вертикальная координата, м, $0 < h < H$; H – высота насадки, м;

$G_{ж}$, $G_{в}$ – удельные массовые расходы воды и сухого воздуха, кг/(м^{2}с);

t, θ – температуры воды и воздуха, °С;

p – парциальное давление пара во влажном воздухе, МПа, $p = f(\theta, \varphi)$;

p_t'', p_θ'' – давление насыщенного пара при температурах t и θ, МПа;

$p_б$ – барометрическое давление окружающего воздуха, МПа;

$c_{ж}$, $c_{св}$, $c_{п}$ – теплоемкость воды, сухого воздуха и пара, кДж/(кг °С);

$c_{вл}$ – теплоемкость влажного воздуха, кДж/(кг °С); $c_{вл} = c_{св} + c_{п}\,x$;

r_0 – теплота парообразования при температуре 0°С, кДж/кг;

r_t, r_θ – теплота парообразования при температуре t и θ, кДж/кг;
$r_t = r_o – (c_ж – c_п)t$;
α_v – объемный коэффициент теплоотдачи, относимый к разности температур воды и воздуха, кДж/(м^{3}с·°С);
$\beta_{рбv}$ – объемный коэффициент массоотдачи, относимый к разности парциальных давлений насыщенного пара и паров над поверхностью жидкости, деленной на барометрическое давление, кг/(м^{3}с).

При получении уравнений (3.4.1.2) для случая насыщенного воздуха использовано предположение Л.Д Бермана о возможности избыточного испарения, при котором интенсивность испарения (коэффициент массоотдачи) сохраняется. Коэффициенты $\beta_{рбv}$ и α_v при этом предположении в обеих системах оказываются одинаковыми и потому сохраняются уравнения интенсивности тепло- и массообмена (3.4.1.1a) и (3.4.1.1b). В ядре потока воздуха избыток испарившегося пара конденсируется до достижения устойчивого состояния насыщения. Конденсат частично возвращается в воду, частично уносится воздухом. В предположении Л.Д. Бермана количество и теплосодержание конденсата исключается из балансовых уравнений, т.е. количество пара, поступившего в воздух, и увеличение теплосодержания воздуха оказываются меньше количества испарившейся воды и теплоты, отданной водой.

В случае насыщения воздуха в насадке при интегрировании переходят от системы (3.4.1.1) к системе (3.4.1.2).

Технологические расчеты градирен состоят в определении температуры охлажденной воды t_2 и сводятся к интегрированию систем (3.4.1.1) и (3.4.1.2) при известных значениях коэффициентов α_v и $\beta_{рбv}$, а также заданных четырех граничных условиях:

– расход воды $G_{ж1}$ на входе в градирню. Вычисляется через задаваемую плотность орошения q_1

$$G_{ж1} = \rho_ж q_1/3600, \qquad (3.4.1.3)$$

где $\rho_ж$ плотность воды ($\rho_ж$ = 1000 кг/м^3);

– температура горячей воды t_1 или температурный перепад $\Delta t = t_1 – t_2$;

– температура входящего воздуха θ_1;

– относительная влажность входящего воздуха φ_1 (парциальное давление пара на входе $p_1 = \varphi_1 p''(\theta)$

Входящий в уравнения расход воздуха $G_в$ определяется в технологических расчетах вентиляторных градирен из уравнения подачи вентилятора, в расчетах башенных градирен – из уравнения естественной тяги.

Задача определения коэффициентов тепло- и массоотдачи является обратной по отношению к задаче тепловых расчетов. Определить искомые коэффициенты возможно при наличии избыточных граничных условий. В данном случае достаточно одного избыточного условия, т.к. коэффициенты тепло- и массоотдачи связаны теоретическим соотношением (2.8):

$$\alpha_v / \beta_{рбv} = 1{,}65 \text{ кДж/(кг·°C)} \qquad (3.4.1.4)$$

Избыточным граничным условием по сравнению с тепловой задачей является температура охлажденной воды t_2. Исходными данными для решения обратной задачи в каждом опыте являются измеренные значения параметров q_1, t_1, t_2, θ_1, φ_1.

Расход сухого воздуха, входящий в уравнения, определяется по формуле

$$G_в = \rho_{в1} w_1, \qquad (3.4.1.5)$$

где $\rho_{в1}$ (θ_1, φ_1) плотность сухого воздуха в паровоздушной смеси (влажном воздухе), кг/м^3; w_1 – средняя скорость воздуха на входе в насадку, м/с.

На стенде измеряется средняя скорость нагретого воздуха на выходе из насадки $w_{2ст}$, м/с. Скорость воздуха на входе в уравнении (3.4.1.5) определяется методом последовательных приближений из условия постоянства расхода сухого воздуха, проходящего через насадку

$$w_1 = (\rho_{в2} w_{2ст})/ \rho_{в1} , \qquad (3.4.1.6)$$

где $\rho_{в2}$ (θ_2, φ_2) – плотность сухого нагретого воздуха, кг/м^3. Параметры нагретого воздуха θ_2, φ_2 определяются тепловым расчетом.

Если не учитывать места измерения скорости на стенде и принимать при расчете коэффициентов в уравнении (3.4.1.5) $w_1 = w_{2ст}$,

то это заведомо приведет к завышению скорости (в уравнении (3.4.1.6) $\rho_{в2} < \rho_{в1}$) и соответственному завышению расхода воздуха, проходящего через насадку. В результате расчетные коэффициенты тепло- и массоотдачи могут оказаться существенно заниженными.

При решении обратной задачи искомым принимается коэффициент $\beta_{рбv}$, а коэффициент α_v вычисляется из зависимости (3.4.1.4). В каждом опыте коэффициент $\beta_{рбvi}$ определяется методом последовательных приближений:

- задается ряд значений $\beta_{рбv,ij}$; $a_{v,i,j}$ вычисляется из (34.1.4); решается тепловая задача при исходных значениях параметров q_1, t_1, θ_1, φ_1; определяется расчетное значение $t_{2,ij}$;
- интерполяцией определяется искомое значение коэффициента $\beta_{рбvi}$, при котором расчетное значение температуры охлажденной воды будет равно опытному значению, т.е. $t_{2,i} = t_2$.

Практикой установлено, что величина коэффициента массоотдачи в процессе испарительного охлаждения пропорциональна произведению относительного расхода воздуха и удельного массового расхода воды и может оцениваться эмпирической зависимостью:

$$\beta_{рбv} = A \cdot \lambda^m G_ж, \qquad (3.4.1.7)$$

где A – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние на коэффициент массоотдачи конструктивных особенностей насадки, $м^{-1}$;

m – эмпирический коэффициент, отражающий влияние расхода воздуха на охлаждение воды в данной конструкции насадки.

Относительный расход воздуха определяется зависимостью

$$\lambda = G_в/G_ж. \qquad (3.4.1.8)$$

Значения величин A, m определяются, для заданной высоты каждой насадки по опытным данным методом наименьших квадратов или по графику зависимости $\beta_{рбv}/G_ж = f(\lambda)$. В логарифмических координатах зависимость представляется в виде прямой линии.

Из зависимостей (3.4.1.7) и (3.4.1.8) следует формула для расчета коэффициента массоотдачи:

$$\beta_{p\text{б}v} = c_\beta \, \lambda^m \, G_\text{ж} \text{ , кг/(м}^3\text{с)}, \qquad (3.4.1.9)$$

где $c_\beta = A/H_\text{нас}$, м$^{-1}$.

Коэффициент теплоотдачи с учетом зависимости (3.4.1.4):

$$\alpha_v = c_\alpha \, \lambda^m \, G_\text{ж} \text{ , кДж/(м}^3\text{с·°С)}, \qquad (3.4.1.10)$$

где $c_\alpha = 1{,}65 \, c_\beta = 1{,}65 \, (A/H_\text{нас})$, м$^{-1}$.

Таким образом, параметры A и m зависимости (3.4.1.7) позволяют для заданной высоты насадки получить расчетные формулы коэффициентов отдачи (3.4.1.9) и (3.4.1.10).

Методика определения объемных коэффициентов тепло- и массоотдачи и далее параметров A и m формулы (3.4.1.7) реализована в программе для ПК ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Значение коэффициента массоотдачи $\beta_{p\text{б}v\text{опыт},i}$ определяется для каждой опытной точки отдельно. Из формулы (3.4.1.9) для той же точки получится отличающееся значение. Точность расчета коэффициента массоотдачи по формуле (3.4.1.9) в каждом опыте оценивается относительной ошибкой

$$\delta_{\beta i} = (\beta_{p\text{б}v\text{опыт},i} - \beta_{p\text{б}v,i})/ \, \beta_{p\text{б}v\text{опыт},i} \qquad (3.4.1.11)$$

где величина $\beta_{p\text{б}v,i}$ рассчитывается по формуле (3.4.1.9). Средняя квадратическая ошибка величины δ_β

$$\sigma_{\delta\beta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\delta_{\beta,i}\right)^2}{n-1}} \qquad (3.4.1.12)$$

где n – число опытных точек.

Величина $\sigma_{\delta\beta}$ служит общей оценкой точности определения коэффициентов тепло- и массоотдачи насадки по результатам испытаний.

В алгоритме программы предусмотрено определение переходных коэффициентов $\kappa_\beta = \kappa_\alpha < 1$, учитывающих неточность расчета коэффициентов по формулам (3.4.1.9) и (3.4.1.10) по сравнению с опытными значениями.

При выполнении технологических (тепловых) расчетов градирни на стадии проектирования в качестве переходных коэффициентов принимались значения

$$\kappa_\beta = \kappa_\alpha = (1 - \sigma_{\delta\beta}). \qquad (3.4.1.13)$$

Переходные коэффициенты κ_β и κ_α входят в эти расчеты как дополнительные множители в формулах (3.4.1.10) и (3.4.1.11):

$$\beta_{рбv\ \text{тех.расч.}} = \kappa_\beta\, c_\beta\, \lambda^m\, G_ж,\ \text{кг/(м}^3\text{с)}; \qquad (3.4.1.14)$$

$$\alpha_{v\ \text{тех.расч.}} = \kappa_\alpha\, c_\alpha\, \lambda^m\, G_ж,\ \text{кДж/(м}^3\text{с °С)}\ . \qquad (3.4.1.15)$$

При установке насадки в градирне из-за технологических погрешностей коэффициенты тепломассоотдачи могут оказаться ниже, чем в лабораторных испытаниях. Скорректировать уменьшение коэффициентов можно путем определения действительных переходных коэффициентов, отличных от расчетных значений (3.4.1.13). Получить эти новые переходные коэффициенты можно по результатам пуско-наладочных испытаний градирен.

3.4.2. Тепломассообменные испытания короткослоевых насадок

Результаты тепломассообменных испытаний короткослоевых насадок представлены в приведённых ниже таблицах 3.4.2.1–3.4.2.4.

Таблица 3.4.2.1

Результаты тепломассообменных испытаний насадки КСН-1 высотой H = 0,96 м ($P_б$ = 101 кПа, S = 0,07 м)

q_1, м^3(м^2 ч)	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	θ_1, °С	φ_1, %	w_2, м/с	λ	$\beta_{рбv}$, кг/(м^3 с)	α_v, кДж/(м^3·с·°С)
11,0	40,1	32,1	8,0	19,0	77	1,0	0,347	1,79	2,95
11,0	40,2	29,8	10,4	19,2	77	1,5	0,523	2,14	3,53
11,0	40,1	27,4	12,7	19,0	76	2,0	0,710	2,64	4,35
9,0	40,1	30,7	9,4	19,3	75	1,0	0,426	1,73	2,85
9,0	40,2	28,0	12,2	19,5	75	1,5	0,648	2,14	3,54
9,0	40,1	25,8	14,3	19,3	74	2,0	0,874	2,52	4,15
7,0	40,2	29,1	11,1	19,4	74	1,0	0,552	1,50	2,47
7,0	40,4	26,3	14,1	19,4	74	1,5	0,841	1,87	3,09
7,0	40,3	24,0	16,3	19,2	73	2,0	1,135	2,25	3,71

По результатам, представленным в таблице 3.4.2.1, получены зависимости:

– коэффициент массоотдачи

$$\beta_{рбv} = 0{,}98 \cdot 1{,}07 \cdot \lambda^{0{,}55}\, G_{ж},\ кг/(м^3 с);$$

– коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = 0{,}98 \cdot 1{,}765 \cdot \lambda^{0{,}55}\, G_{ж},\ кДж/(м^3 с \cdot °C).$$

Переходные коэффициенты $\kappa_\beta = \kappa_\alpha = 0{,}98$. Средняя квадратичная ошибка вычисления коэффициентов $\sigma_{\delta\beta} = 0{,}018$.

Таблица 3.4.2.2

Результаты тепломассообменных испытаний насадки КСН-2 высотой H = 1,05 м ($P_б$ = 102 кПа, S = 0,07 м)

q_1, м³(м² ч)	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	θ_1, °С	φ_1, %	w_2, м/с	λ	$\beta_{рбv}$, кг/(м³ с)	α_v, кДж/(м³·с·°С)
10,9	39,6	31,6	8,0	20,5	83	1,0	0,352	2,76	4,55
11,0	39,8	29,3	10,5	20,5	82	1,5	0,525	3,01	4,97
11,0	40,0	27,3	12,7	20,7	80	2,0	0,706	3,53	5,83
9,1	40,2	30,6	9,6	20,8	79	1,0	0,422	2,52	4,16
9,1	40,3	28,0	12,3	21,0	79	1,5	0,642	2,83	4,67
9,1	40,2	25,9	14,3	21,0	78	2,0	0,867	3,29	5,42
7,1	40,0	28,9	11,1	21,0	78	1,0	0,546	2,10	3,46
7,1	39,9	26,2	13,7	21,1	78	1,5	0,833	2,48	4,08
7,1	39,8	24,3	15,5	21,1	77	2,0	1,125	2,85	4,7

По результатам, представленным в таблице 3.4.2.2, получены зависимости:

– коэффициент массоотдачи

$$\beta_{рбv} = 0{,}98 \cdot 1{,}352 \cdot \lambda^{0{,}38}\, G_{ж},\ кг/(м^3 с);$$

– коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = 0{,}98 \cdot 2{,}23 \cdot \lambda^{0{,}38}\, G_{ж},\ кДж/(м^3 с °C).$$

Переходные коэффициенты $\kappa_\beta = \kappa_\alpha = 0{,}98$. Средняя квадратичная ошибка вычисления коэффициентов $\sigma_{\delta\beta} = 0{,}025$.

Таблица 3.4.2.3

Результаты тепломассообменных испытаний насадки КСН-3 высотой H = 1,19 м ($P_б$ = 102 кПа, S = 0,07 м)

q_1, м³(м² ч)	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	θ_1, °С	φ_1, %	w_2, м/с	λ	$\beta_{рбv}$, кг/(м³ с)	α_v, кДж/(м³·с·°С)
10,8	40,0	31,6	8,4	22,2	74	1,0	0,353	2,95	4,87
10,9	40,1	29,2	10,9	22,7	72	1,5	0,532	2,96	4,89
10,9	40,0	27,1	12,9	22,7	71	2,0	0,717	3,39	5,59
9,1	40,2	30,6	9,6	22,8	71	1,0	0,421	2,50	4,13
9,1	40,4	28,0	12,4	23,1	70	1,5	0,640	2,73	4,51
9,0	40,4	25,9	14,5	23,2	69	2,0	0,873	3,13	5,16
7,1	40,2	28,9	11,3	23,2	68	1,0	0,544	2,06	3,39
7,1	40,4	26,3	14,1	23,3	69	1,5	0,829	2,40	3,95
7,1	40,2	24,4	15,8	23,4	67	2,0	1,120	2,73	4,5

По результатам, представленным в таблице 3.4.2.3, получены зависимости:

– коэффициент массоотдачи

$$\beta_{рбv} = 0{,}96 \cdot 1{,}28 \cdot \lambda^{0{,}31} G_ж, \text{ кг/(м}^3\text{с)};$$

– коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = 0{,}96 \cdot 2{,}113 \cdot \lambda^{0{,}31} G_ж, \text{ кДж/(м}^3\text{с°С)}.$$

Переходные коэффициенты $\kappa_\beta = \kappa_\alpha = 0{,}96$. Средняя квадратичная ошибка вычисления коэффициентов $\sigma_{\delta\beta} = 0{,}052$.

Таблица 3.4.2.4

Результаты тепломассообменных испытаний насадки КСН высотой H = 0,9 м ($P_б$ = 101 кПа, S = 0,07 м)

q_1, м³(м² ч)	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	θ_1, °С	φ_1, %	w_2, м/с	λ	$\beta_{рбv}$, кг/(м³ с)	α_v, кДж/(м³·с·°С)
11,2	39,3	30,3	9,0	18,5	54	1,0	0,339	3,53	5,82
11,0	39,4	27,3	12,1	18,4	50	1,5	0,526	3,41	5,63
11,0	39,4	24,7	14,7	18,3	48	2,0	0,710	4,05	6,68
9,2	39,5	28,9	10,6	18,5	48	1,0	0,414	2,85	4,7
8,9	39,3	25,3	14,0	18,4	47	1,5	0,656	3,15	5,19
9,0	39,3	22,7	16,6	18,3	46	2,0	0,875	3,81	6,28
7,0	39,4	26,7	12,7	18,4	46	1,0	0,552	2,28	3,76
7,0	39,5	23,3	16,2	18,4	46	1,5	0,842	2,78	4,58
7,0	39,2	20,7	18,5	18,3	44	2,0	1,140	3,25	5,36

По результатам, представленным в таблице 3.4.2.4, получены зависимости:

- коэффициент массоотдачи

$$\beta_{p6v} = 0{,}94 \cdot 1{,}631 \cdot \lambda^{0{,}6}\, G_{ж},\ кг/(м^3с);$$

- коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = 0{,}94 \cdot 2{,}691 \cdot \lambda^{0{,}6}\, G_{ж},\ кДж/(м^3с°С).$$

Переходные коэффициенты $к_\beta = к_\alpha = 0{,}94$. Средняя квадратичная ошибка вычисления коэффициентов $\sigma_{\delta\beta} = 0{,}066$.

3.4.3. Гидродинамические испытания короткослоевых насадок

Результаты гидродинамических испытаний короткослоевых насадок приведены в табл. 3.4.3.1, где представлены измеренные значения перепада давления на насадке ΔP и коэффициенты сопротивления $\xi_{нас}$ рассчитанные по формуле Вейсбаха.

Таблица 3.4.3.1

Гидродинамические характеристики короткослоевых насадок

q_1, м³/(м²·ч)		0					7,1					9,2					11,0				
w_2, м/с		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,0	1,5	2,0	2,5	2,8	1,0	1,5	2,0	2,5	2,8	1,0	1,5	2,0	2,5	2,8
Тип насадки	$H_{нас}$, м	Перепад давления ΔP, Па / Коэффициент гидродинамического сопротивления $\xi_{нас}$																			
КСН-1	0,96	6,47 10,8	13,9 10,3	24,7 10,3	38,06 10,1	54,5 10,1	6,86 11,4	16,28 12,1	29,6 12,3	47,8 12,8	62,39 13,2	7,8 13,1	17,26 12,8	31,58 13,2	50,8 13,5	65,3 13,9	8,24 13,7	17,8 13,2	32,5 13,6	52,7 14,1	67,3 14,3
КСН-2	1,05	0					7,1					9,0					11,0				
		8,24 13,7	18,6 13,8	31,9 13,3	49,2 13,1	69,6 12,9	10,7 18,0	22,5 16,7	39,8 16,6	63,9 17,0	80,05 17,0	11,7 19,6	23,5 17,4	41,7 17,4	65,9 17,6	82,01 17,4	12,16 20,3	24,5 18,2	42,7 17,8	66,9 17,8	84,9 18,1
КСН-3	1,19	0					7,2					9,0					11				
		11,7 19,6	25,8 19,2	45,7 19,0	30,9 18,7	99,08 18,4	13,7 22,9	30,0 22,2	52,9 22,1	85,5 22,8	107,9 22,9	15,6 26,2	31,4 23,2	55,5 23,1	87,5 23,3	111,8 23,8	15,7 26,2	32,4 24,0	57,5 23,9	89,4 23,9	125,5 26,7
КСН	0,9	0					7,0					9,0					11,0				
		1,0	1,3	2,0	2,5	3,0	1,0	1,3	2,0	2,5	2,8	1,0	1,3	2,0	2,5	2,8	1,0	1,3	2,0	2,5	2,8
		11,4 19,0	23,1 18,4	44,7 18,6	57,8 18,1	97,1 18,0	14,1 23,5	29,6 21,9	52,6 21,9	81,4 21,7	102,0 21,7	14,5 24,2	31,0 23,0	54,5 22,7	83,6 22,3	104,3 22,2	15,3 25,5	32,4 24,0	55,5 23,1	85,5 22,8	107,9 22,9

Сопротивление сухой насадки является составной частью полного сопротивления орошаемой насадки. Испытания сухой насадки проводили в диапазоне скоростей воздуха в расчете на полное сечение пустого аппарата $w_o = 1{,}0 \div 3{,}0$ м/с. Гидравлические испытания орошаемой насадки проводили в режиме противотока

в системе «газ-жидкость». Плотность орошения жидкости изменяли в пределах $q_ж$ = 7,0÷11,0 м^3/(м^2·ч).

На рис. 3.4.3.1 представлены графическая зависимость гидравлического сопротивления сухих короткослоевых насадок, отнесенного к высоте насадки, от скорости воздуха $\Delta P/H = f(w_o)$ и сравнение с базовой насадкой типа «19» высотой блока H = 0,91 м. Испытания базовой насадки проводились на том же стенде в идентичных условиях.

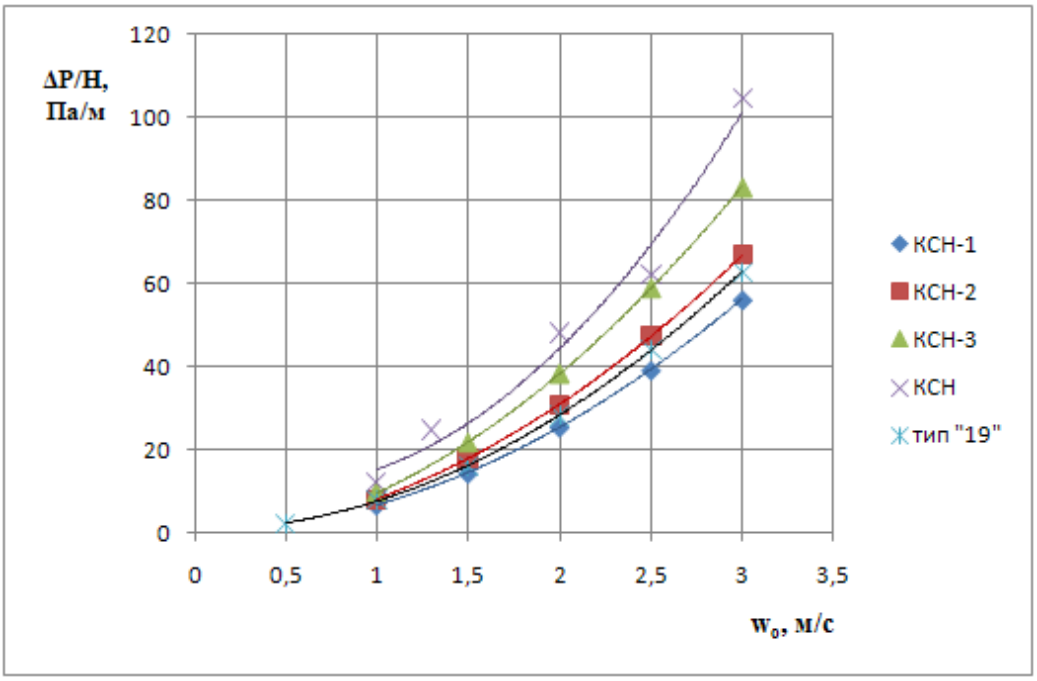


Рис. 3.4.3.1. Зависимость гидравлического сопротивления сухих (при q = 0 м^3/(м^2·ч)) насадок КСН-1, КСН-2, КСН-3, КСН и насадки типа «19» высотой блока H = 0,91м от скорости воздушного потока

Гидравлическое сопротивление сухой насадки рассчитывают по формуле (2.2), продублируем её:

$$\frac{\Delta P_{сух}}{H} = \xi_{сух} \cdot \frac{w_o^2 \rho_г a}{8\varepsilon^3} \qquad (3.4.3.1)$$

Коэффициент сопротивления ξ учитывает потерю давления от трения газа о поверхность насадки и от изменения скорости и направления газового потока при протекании его по каналам насадки. Коэффициент сопротивления зависит от режима движения газа и является функцией критерия Рейнольдса Re для газовой

фазы. Расчетное уравнение для ξ может быть представлено зависимостью (2.3), повторим её:

$$\xi = \frac{A}{\mathrm{Re}^n} \qquad (3.4.3.2)$$

Критерий Рейнольдса Re рассчитывают по формуле:

$$\mathrm{Re} = \frac{4w_o}{a\upsilon_г}, \qquad (3.4.3.3)$$

так как $d_{экв} = \frac{4\varepsilon}{a}$ (формула (1.5.1)), а $w = w_0/\varepsilon$ (глава 2).

Графики зависимости коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса Re при диапазоне скоростей воздуха $1{,}0 \le w \le 3{,}0$ м/с представлены на рис. 3.4.3.2.

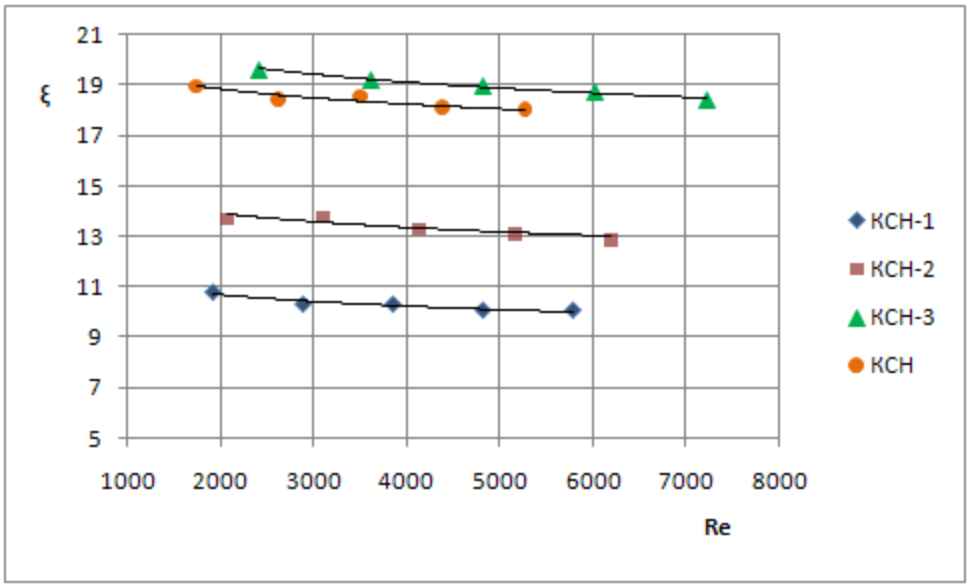


Рис. 3.4.3.2. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить следующие зависимости в соответствующих диапазонах значений критерия Рейнольдса по газу:

КСН-1 $$\xi = \frac{16{,}76}{\mathrm{Re}^{0{,}059}} \quad (1928 \le \mathrm{Re} \le 5785) \qquad (3.4.3.4)$$

КСН-2 $$\xi = \frac{21{,}98}{\mathrm{Re}^{0{,}06}} \quad (2064 \le \mathrm{Re} \le 6192) \qquad (3.4.3.5)$$

КСН-3 $$\xi = \frac{30{,}19}{\mathrm{Re}^{0{,}055}} \quad (2405 \le \mathrm{Re} \le 7214) \qquad (3.4.3.6)$$

КСН $$\xi = \frac{26{,}69}{\mathrm{Re}^{0{,}046}} \quad (1754 \le \mathrm{Re} \le 5263) \qquad (3.4.3.7)$$

Результаты гидравлических испытаний короткослоевых насадок на системе «вода – воздух» представлены в виде графических зависимостей гидравлического сопротивления от скорости движения воздуха, а также в сравнении с базовой насадкой типа «19» (рис. 3.4.3.3).

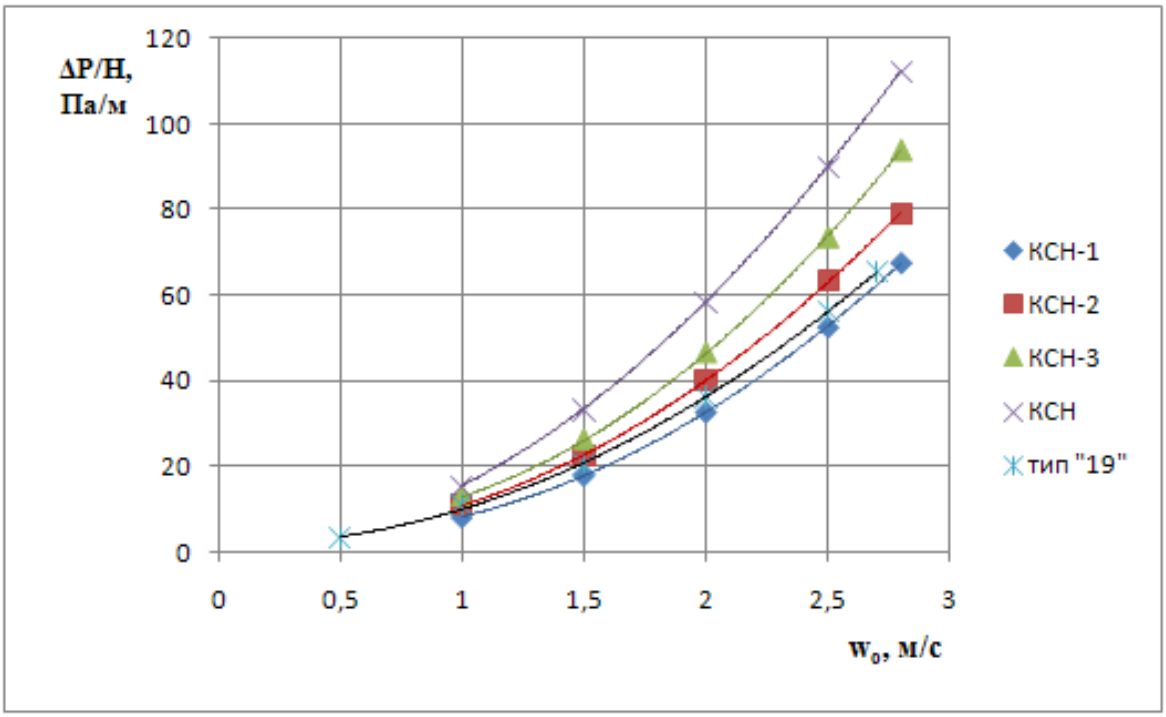


Рис. 3.4.3.3. Зависимость гидравлического сопротивления насадок КСН-1, КСН-2, КСН-3, КСН при плотности орошения q = 9 м³/(м²·ч) и базовой насадки типа «19» высотой блока H = 0,91 м при плотности орошения q = 10 м³/(м²·ч) от скорости воздушного потока

Как обсуждалось в главе 2, гидравлическое сопротивление орошаемой насадки рассчитывается по уравнению аналогичному (3.4.3.1):

$$\frac{\Delta P_{\text{ор}}}{H} = \xi_{\text{ор}} \cdot \frac{w_o^2 \rho_г a}{8\varepsilon^3} \qquad (3.4.3.8)$$

Обобщенную зависимость коэффициента сопротивления насадки от плотности орошения $\xi_{op} = f(q_1)$ представляют линейной зависимостью:

$$\xi_{op} = (\xi_{сух} + K\zeta_{нас}\, q_1)H \qquad (3.4.3.9)$$

На основе экспериментальных данных получены зависимости для определения гидравлического сопротивления орошаемых насадок и определена средняя квадратичная ошибка формулы $\sigma_{\zeta нас}$.

КСН-1 $$\xi_{op} = \left(\frac{16{,}76}{Re^{0{,}059}} + 0{,}38q_1\right)H \quad \sigma_{\zeta нас} = 0{,}11 \qquad (3.4.3.10)$$

КСН-2 $$\xi_{op} = \left(\frac{21{,}98}{Re^{0{,}06}} + 0{,}46q_1\right)H \quad \sigma_{\zeta нас} = 0{,}22 \qquad (3.4.3.11)$$

КСН-3 $$\xi_{op} = \left(\frac{30{,}19}{Re^{0{,}055}} + 0{,}5q_1\right)H \quad \sigma_{\zeta нас} = 0{,}11 \qquad (3.4.3.12)$$

КСН $$\xi_{op} = \left(\frac{26{,}69}{Re^{0{,}046}} + 0{,}45q_1\right)H \quad \sigma_{\zeta нас} = 0{,}23 \qquad (3.4.3.13)$$

В качестве примера приведем зависимость отношения гидравлических сопротивлений орошаемой насадки от плотности орошения для короткослоевых насадок при w_o = 2 м/с (рис. 3.4.3.4).

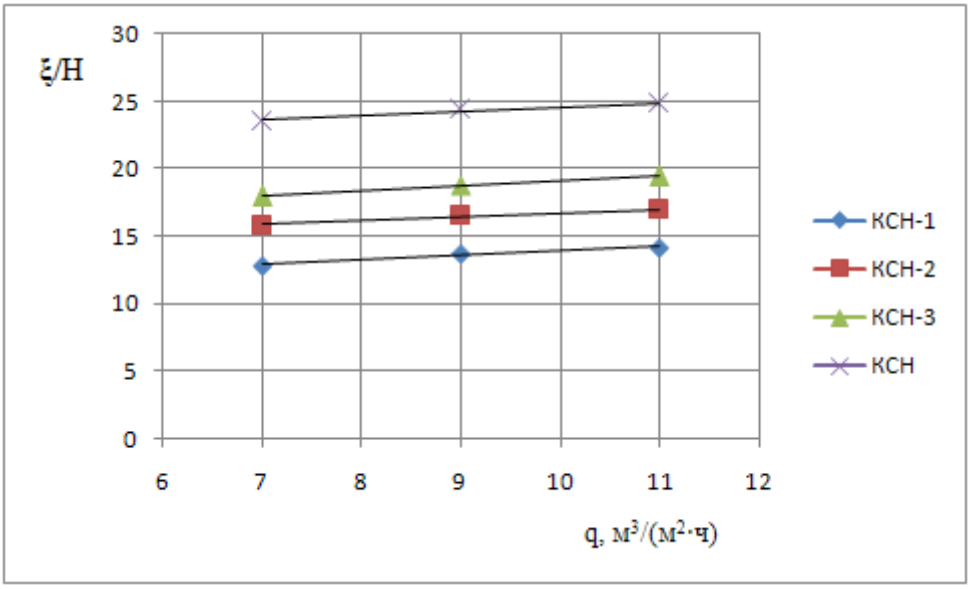
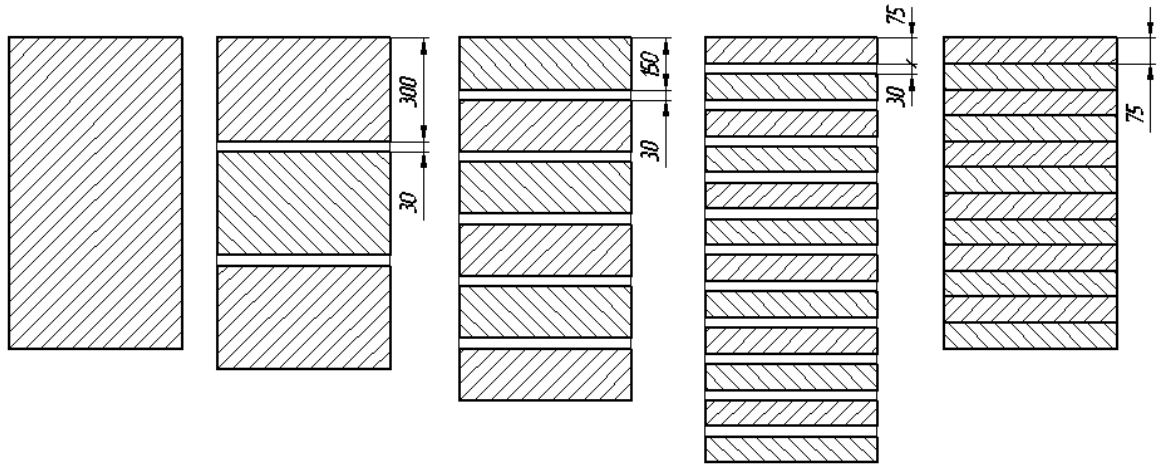


Рис. 3.4.3.4. График зависимости коэффициента сопротивления 1 метра высоты орошаемой насадки от плотности орошения

3.4.4. Определение рационального способа укладки короткослоевой насадки

Для определения эффективности отдельного слоя различной высоты в блоке насадки проанализируем экспериментальные данные. На рис. 3.4.4.1 схематично представлена укладка исследуемой насадки.



базовая насадка тип «19» (а) | *1-я серия опытов КСН-1 (б)* | *2-я серия опытов КСН-2 (в)* | *3-я серия опытов КСН-3 (г)* | *4-я серия опытов КСН (д)*

Рис. 3.4.1.1. Исследуемые блоки регулярной насадки

Для определения эффективности отдельного слоя различной высоты в блоке насадки проанализируем экспериментальные данные. Используя представленные в разделе 3.4.2 зависимости, найдём объёмный коэффициент массоотдачи – β_v одного слоя в блоке насадки для каждой серии опытов: для КСН-1 (высота слоя h = 300 мм), для КСН-2 (высота слоя h = 150 мм), для КСН-3 (высота слоя h = 75 мм).

Количество испарившейся воды $G = \beta \cdot H \cdot F$, где H – высота насадки, м, F – площадь поперечного сечения градирни, м^2. Блок насадки состоит из слоёв и разрывов, следовательно, получаем выражение

$$G = \beta_{\text{блока}} \cdot H \cdot F = \beta_{\text{слоя}} \cdot h \cdot F \cdot N + \beta_{\text{разр.}} \cdot \delta \cdot F \cdot n, \quad (3.4.1.1)$$

где h – высота слоя в блоке, мм;

N – количество слоёв в блоке насадки;

δ – высота разрыва между слоями в блоке, м;

n – количество разрывов между слоями в блоке.

Для определения коэффициента массоотдачи одного слоя во всех исследуемых насадках найдем коэффициент массоотдачи одного разрыва (величина разрыва во всех сериях КСН-1, КСН-2, КСН-3 δ = const), используя насадки КСН-3 и КСН и при условии $\beta_{\text{слоя КСН}} = \beta_{\text{блока КСН}} = 3{,}81$ кг/(м^3·ч):

$$\beta_{\text{разр}} = \frac{\beta_{\text{блока}} \cdot H - \beta_{\text{слоя}} \cdot h \cdot N}{\delta \cdot n} = 1{,}35\,\text{кг} / \left(м^3 \cdot ч\right)$$

Определим коэффициент массоотдачи одного слоя для КСН-1 и КСН-2.

$$\beta_{\text{слоя КСН-1}} = \frac{\beta_{\text{блока}} \cdot H - \beta_{\text{разр}} \cdot \delta \cdot n}{h \cdot N} = 2{,}62\,\text{кг} / \left(м^3 \cdot ч\right)$$

$$\beta_{\text{слоя КСН-2}} = \frac{\beta_{\text{блока}} \cdot H - \beta_{\text{разр}} \cdot \delta \cdot n}{h \cdot N} = 3{,}61\,\text{кг} / \left(м^3 \cdot ч\right)$$

Как и следовало ожидать, в разрывах между слоями насадки коэффициент массоотдачи существенно меньше, чем у слоя насадки.

Результаты анализа влияния высоты слоя на объемный коэффициент массоотдачи приведены на рис. 3.4.1.2.

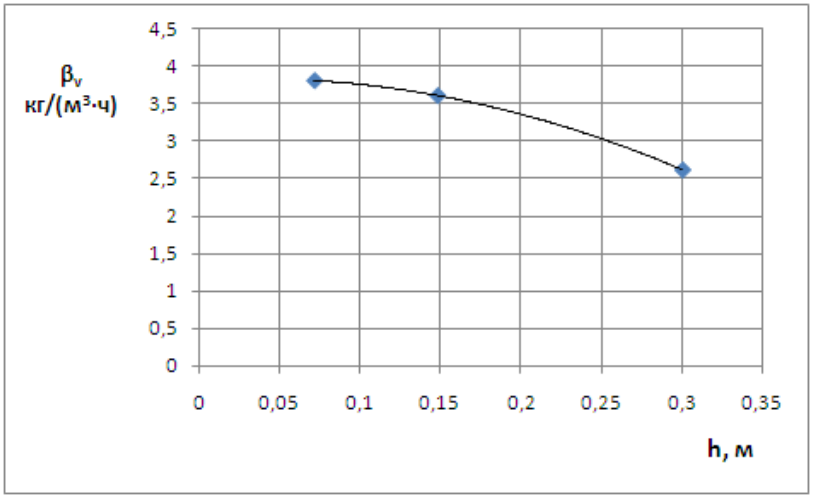


Рис. 3.4.1.2. Зависимость объёмного коэффициента массоотдачи, от высоты слоя

Из графика видно, что при уменьшении высоты слоя от 0,3 м до 0,075 м коэффициент массоотдачи увеличивается на 45%. Можно сделать вывод, что использование коротких слоёв в блоках насадки является наиболее перспективным направлением интенсификации процессов тепломассообмена.

Исходя из литературных данных [5–7], целесообразно выполнять блок с разрывом и поворотом соседних слоёв. Экспериментальные данные показали, что максимальные значения объёмного коэффициента массоотдачи блока насадки достигаются при высоте слоя h = 0,075м.

Сравним экспериментальные данные базовой блочной насадки типа «19» (рис. 3.4.1.1, а) с насадкой КСН-3 с минимальной высотой слоёв h = 0,075м, которые располагались с разрывами и поворотом относительно друг друга (рис. 3.4.1.1, г).

У насадки с разрывами при той же высоте блока объемный коэффициент массоотдачи β_v оказывается выше, чем у базовой блочной насадки, гидравлическое сопротивление осталось таким же, следовательно, насадка с разрывами и меньшей высотой слоя более эффективна, чем базовая, при меньшей материалоемкости.

Представляется целесообразным проанализировать эффективность насадки с разрывами и поворотом соседних слоёв КСН-3 (рис. 3.4.1.1, г) и насадки без разрывов и с поворотом КСН (рис. 3.4.1.1, д). При одинаковом количестве испарившейся жидкости выражение (3.4.1.1) примет вид:

$$\beta_{\text{КСН-3}} \cdot H_{\text{КСН-3}} \cdot F = \beta_{\text{КСН}} \cdot H_{\text{КСН}} \cdot F$$

откуда

$$H_{\text{КСН–3}} = \frac{\beta_{\text{КСН}}}{\beta_{\text{КСН-3}}} \cdot H_{\text{КСН}} = 1,217 \cdot H_{\text{КСН}}$$

Например, если рассматривать блок КСН-3 высотой, равной $H_{\text{КСН-3}}$ = 1 м, тогда высота блока КСН должна составлять $H_{\text{КСН}}$ = 0,82 м. Гидравлическое сопротивление насадки КСН по отношению к КСН-3 возрастёт незначительно или останется таким же. Большая эффективность насадки без разрывов и с поворотом, по сравнению с насадками с разрывом, объясняется меньшим значением коэффициента массоотдачи в разрывах между слоями насадки.

Высота слоя в блоке КСН-3 складывается из высоты слоя и высоты разрыва $h_{КСН-3} = 0,075 + 0,03 = 0,105$ м. Соответственно, можем определить количество слоёв в блоке – N:

$$N_{КСН-3} = H_{КСН-3} / h_{КСН-3} = 1/0,105 = 9,5$$

$$N_{КСН} = H_{КСН} / h_{КСН} = 0,82/0,075 = 11$$

При увеличении числа слоёв общая высота блока КСН уменьшится.

Рассчитаем примерную материалоемкость корпуса квадратной градирни и насадки КСН. По сравнению с насадкой с разрывами КСН-3 высотой 1 м, необходимая высота насадки КСН уменьшится до 0,82 м, соответственно и высота корпуса градирни тоже уменьшится на 0,18 м, затраты на материалы снизятся на 3552 рубля (в ценах 2022 г.).

Таким образом, целесообразно выполнять насадку не так, как рекомендуется в литературе [5–7] с разрывами между слоями, а без разрывов с поворотом слоёв на 90°. При этом максимальная эффективность достигается при использовании коротких слоёв.

Анализ экспериментальных данных показал, что при замене сплошного блока регулярной насадки на блок, состоящий из отдельных слоёв, установленных с разрывом и поворотом, объёмный коэффициент массоотдачи увеличивается на 20÷30 % при снижении, соответственно, материалоемкости насадки, что подтверждает теоретические предпосылки.

Выполнение блока насадки из отдельных слоёв с поворотом и без разрывов увеличивает коэффициент массоотдачи на 17÷20 % по сравнению с блоком с разрывами между слоями, но при одинаковом количестве испаряемой воды материалоемкость блока увеличивается на 27% при уменьшении его высоты на 24%, что подтверждено экспериментом.

Результаты опытов с короткослоевой насадкой показывают, что при идентичной высоте блока насадки, равной базовому аналогу насадки типа «19», насадка типа КСН позволяет на 25÷30 % увеличивать эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды. Другой возможный на практике вариант – сохранение той же эффективности, которая была у базовой насадки, при существенном сокращении габаритов насадки (ее высоты), а, следовательно, и материалоемкости аппарата в целом.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства короткослоевой регулярной насадки с косыми гофрами?
2. Что представляет из себя блок новой короткослоевой насадки – КСН?
3. Устройство, принцип действия стенда для гидравлических испытаний насадки КСН.
4. Устройство, принцип действия стенда для определения тепломассообменных характеристик насадки КСН.
5. Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи по результатам тепломассообменных испытаний.
6. Определение потерь давления в сухой и орошаемой насадке.
7. Определение наиболее рационального способа укладки регулярной насадки.

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КАПЛЕУЛАВЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

4.1. Перспективы интенсификации каплеулавливающей техники

Во многих производственных процессах химической, металлургической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности получают или перерабатывают различные природные и искусственные газы, большая часть которых затем выбрасывается в атмосферу как отход производства. В большинстве случаев промышленные газы содержат во взвешенном состоянии мелкие частицы жидкости (капли). Капельные выбросы представляют серьезную угрозу окружающей среде. Применение каплеулавливающих устройств, в том числе и в градирнях, позволяет существенно снизить капельный вынос из аппаратов и, таким образом, уменьшить их влияние на окружающую среду.

Помимо отрицательного экологического аспекта капельные выбросы оказывают негативное влияние на работу различного оборудования в теплоэнергетической, химической, легкой и других отраслях промышленности. Мелкодисперсная фаза, попадая в рабочую среду, сильно ее загрязняет. При движении такой загрязненной рабочей среды вдоль стенок аппарата происходит осаждение дисперсной фазы на поверхностях оборудования. Со временем количество этих отложений увеличивается вследствие коалесценции или коагуляции. Например, при турбулентном движении потока рабочей среды мелкие капельки в результате поступательного и броуновского движений, образования вихрей сталкиваются между собой, со стенками различного оборудования и образуют более крупные капли, прилипают к стенке аппарата и увеличивают тем самым толщину отложений. Наличие таких отложений и образование дополнительной фазы не лучшим образом сказывается на работе аппарата. Для увеличения эффективности работы аппаратов в конструкции предусматриваются устройства для улавливания капель. Каплеулавливающие устройства должны обеспечивать высокую эффективность улавливания капель, при этом быть просты и дешевы при изготовлении.

Снижение потерь капельной жидкости является актуальной технической задачей и с точки зрения ресурсосбережения при аппаратурном оформлении колонных аппаратов для осуществления процессов химической технологии, градирен.

В этой связи дальнейшее совершенствование конструкций каплеулавливающих устройств является актуальной задачей в энергетической, химической и других отраслях промышленности.

4.2. Механизмы процесса улавливания капель

У различных типов каплеулавливающих устройств механизм каплеулавливающего действия имеет свои особенности [1]. Принцип работы практически всех каплеулавливающих устройств заключается в осаждении на рабочей поверхности летящих вверх в потоке газа капель жидкости, которое происходит под действием инерционных сил, возникающих в потоке в результате изменения направления его скорости. Капли по инерции сохраняют свою первоначальную траекторию движения и, сталкиваясь с поверхностью каплеуловителя, оседают на ней. Такой механизм называется инерционным.

Помимо инерционного актуальны следующие механизмы осаждения капель на поверхности слоя каплеулавливающего устройства и укрупнения в процессе витания [1]:

– гравитационный;
– зацепление;
– коагуляция;
– диффузионный;
– центробежный.

Действия механизмов осаждения заключаются в следующем.

Гравитационный: капли крупнее 40–50 мкм выпадают из газового потока под действием силы тяжести.

Зацепление: капли при перемещении вместе с газовым потоком в относительной близости от рабочей поверхности каплеуловителя приходят в соприкосновение с ней и прилипают к ней.

Коагуляция: увеличение среднего размера капель за счет слипания мелких капель с образованием частиц более крупных разме-

ров. Данный процесс значительно облегчает последующее их осаждение в каплеулавливающих устройствах и повышает эффективность улавливания капель.

Диффузионный: мелкие капли перемещаются в газовом потоке благодаря столкновениям с газовыми молекулами (броуновское движение), в результате чего возможно их попадание на поверхность каплеулавливающего устройства.

Центробежный: капли выводятся из вращающегося газового потока под действием центробежной силы.

Действие этих механизмов осаждения капель жидкости на поверхности каплеулавливающего устройства и их коагуляции в потоке газа, показаны на рис. 4.2.1.

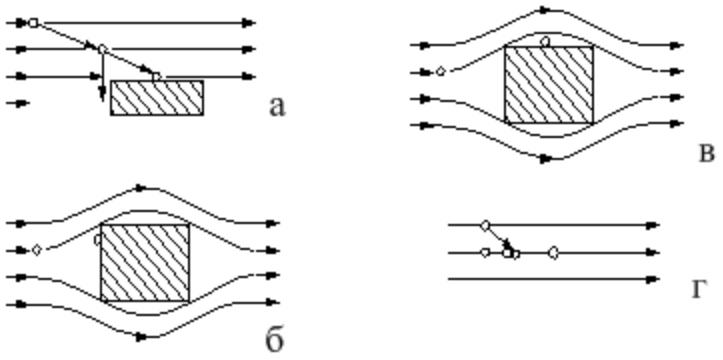


Рис. 4.2.1. Механизмы осаждения взвешенных частиц:
а – гравитационный; б – инерционный; в – зацепления; г – коагуляции

4.3. Типы каплеулавливающих устройств

Насадочные каплеулавливающие устройства относительно просты по конструкции и поэтому находят широкое применение в процессах газоочистки.

На рис. 4.3.1 представлена классификация насадочных каплеуловителей. Каждый из представленных каплеуловителей имеет свои особенности и оптимальный диапазон скоростей по газу.

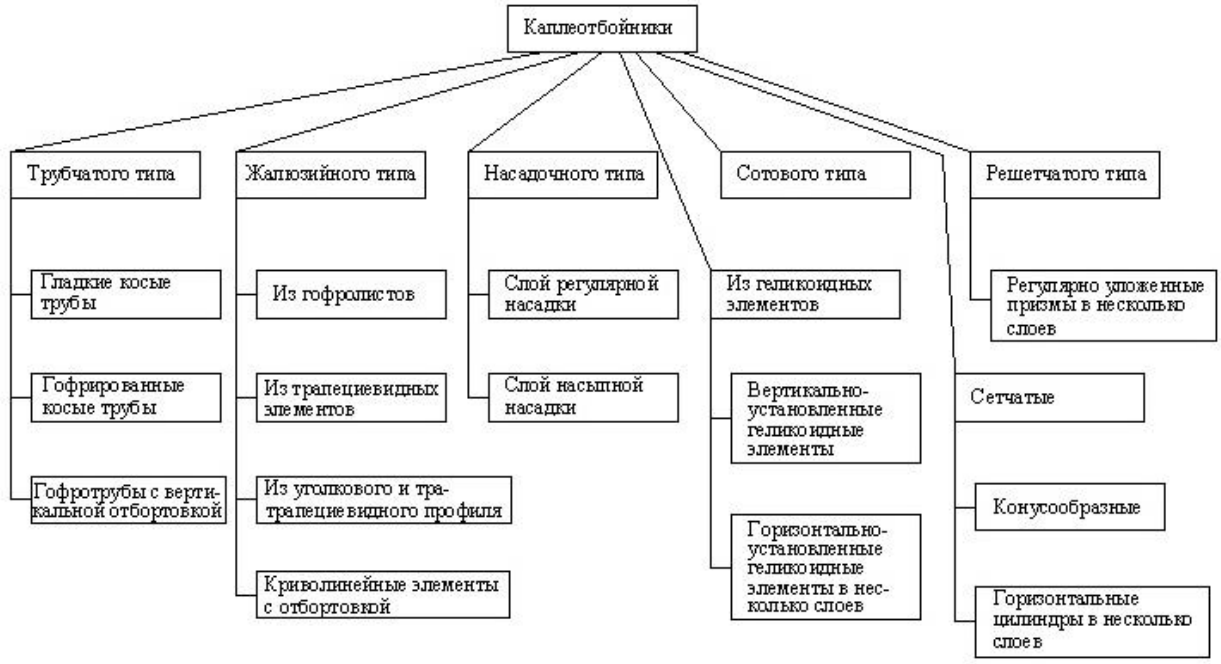


Рис. 4.3.1. Классификация каплеулавливающих устройств

Определяющими при осуществлении процесса улавливания капель в каплеулавливающих устройствах контактных аппаратов являются следующие параметры и характеристики:

– скорость газовой фазы в расчете на полное сечение пустого аппарата;

– удельная нагрузка по жидкости в аппарате;

– соотношение потоков «газ – жидкость» в аппарате;

– размеры и дисперсный состав капель;

– геометрические характеристики (поверхность каплеуловителя, форма каплеуловителя, особенности структуры, высота и угол наклона поверхности элемента каплеуловителя);

– живое сечение – f, %;

– коэффициент извилистости;

– удельная поверхность каплеотбойных устройств – a, $м^2/м^3$;

– порозность (доля свободного объема) – ε, $м^3/м^3$;

– эквивалентный диаметр канала – $d_э$, м.

Жалюзийные каплеуловители (рис. 4.3.2) относятся к числу наиболее распространенных конструкций каплеулавливающих устройств, нашедших широкое применение для улавливания капель в абсорбционных аппаратах колонного типа, выпарных аппаратах, газосепараторах, системах кондиционирования воздуха, го-

ризонтальных камерах очистки воздуха от сероводорода, сепараторах очистки вторичного пара, аппаратах мокрой очистки, градирнях и т.д.



Рис. 4.3.2. Каплеуловитель жалюзийного типа

В зависимости от требований, предъявляемых к очистке газов, числа и дисперсного состава уносимых из аппарата капель в качестве рабочих элементов каплеуловителей применяются пакеты жалюзи с различным шагом.

Профиль пластин каплеуловителя может быть различным в зависимости от предъявляемых требований (рис. 4.3.3).

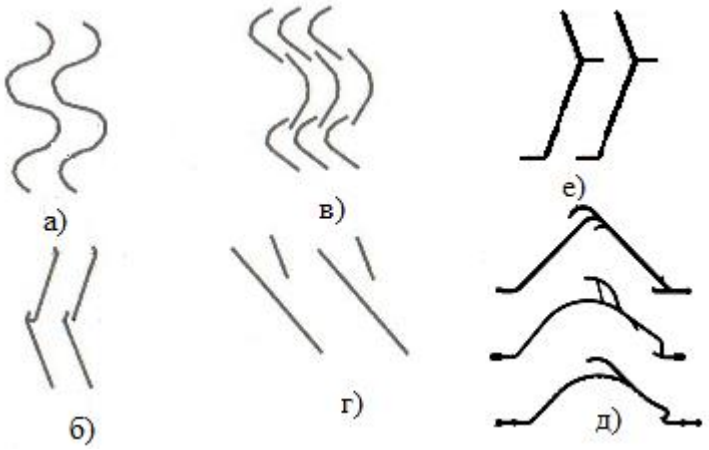


Рис. 4.3.3. Профили жалюзийных каплеуловителей:
а – волнообразные; б – уголковые с выступами; в – волнообразные с разрывами; г – пластинчатый с отбойными пластинками;
д – с ловушкой по ходу газа; е – z-образный профиль

Основными параметрами жалюзийного канала (рис. 4.3.4) являются [1]:

– шаг пластин t;

– ширина канала t-δ, где δ – толщина материала пластины;

– угол раскрытия профиля *2*α;
– число ступеней сепарации;
– радиус закругления кромок изгиба *r*;
– перекрытие канала Δ;
– высота профиля *H*.

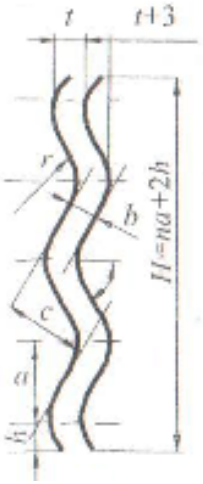


Рис. 4.3.4. Основные параметры канала жалюзийного каплеуловителя

В зависимости от расположения различают горизонтальные, вертикальные и наклонные жалюзийные каплеуловители.

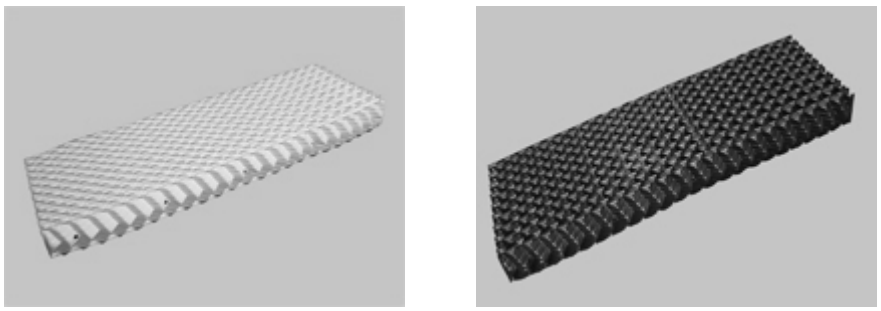
В каплеулавливающих устройствах жалюзийного типа, образующих своей поверхностью криволинейные каналы, капли жидкости, выносимые воздушным потоком, продолжая свое инерционное движение по вертикальной траектории вверх попадают на криволинейную стенку поверхности каплеуловителя, укрупняются и стекают вниз в виде пленки под действием сил гравитации. При скоростях воздушного потока $w_0 > 2{,}0$ м/с возможно частичное разрушение пленки жидкости и повторный унос капель жидкости с восходящим потоком воздуха.

Чтобы исключить явление «повторного уноса» капель жидкости из аппарата в каплеулавливающих устройствах жалюзийного типа в ряде случаев используют дополнительные вертикальные участки, которые устанавливают в верхней части каплеуловителя. Также для улучшения эффективности улавливания капель увеличивают рабочую поверхность каплеуловителя за счет нанесения на рабочую поверхность гофр ловушек по ходу газа.

Трубчатые каплеуловители (рис. 4.3.5, а) представляют собой решетку, выполненную из соединенных между собой косых

труб. Принцип действия трубчатых каплеуловителей такой же, как и у каплеуловителей жалюзийного типа. Капли жидкости, уносимые восходящим потоком воздуха, проходя через ряд параллельно установленных косых труб, продолжая по инерции движение прямолинейно, попадают на наклонную часть поверхности труб, коалесцируют и стекают вниз под действием собственного веса.

В последнее время ведется активная работа в области разработок и усовершенствования каплеулавливающих устройств, выполненных из гофрированных дренажных труб [2] (рис. 4.3.5, б). В этом случае регулярная искусственная шероховатость поверхности гофрированных труб увеличивает вероятность «захвата» капель, уносимых выходящим из аппарата потоком воздуха. Однако при этом существенно увеличивается аэродинамическое сопротивление всей конструкции.



а) *б)*

Рис. 4.3.5. Каплеуловители трубчатого типа:
а – каплеуловитель, выполненный из гладких труб;
б – каплеуловитель выполненный из гофрированных труб

Для увеличения эффективности действия каплеуловителя, его рабочей поверхности и исключения явления «повторного уноса» капель жидкости из аппарата в каплеулавливающем устройстве в ряде случаев используют дополнительные вертикальные участки.

Перспективность широкого использования каплеуловителей из гофрированных труб требует оптимизации размеров, что в свою очередь, обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований с целью определения гидродинамических характеристик [2].

Сеточные каплеуловители (рис. 4.3.6) представляют собой пакеты из набора слоев гофрированных сеток трикотажного плете-

ния от 50 до 150 мм и пористостью 97–99%. Сетка обычно изготавливается из нержавеющей проволоки, фторопласта или других полимерных материалов. Принцип действия таких сепараторов основан на захвате капель волокнами с непрерывным выводом из слоя сетки уловленной жидкости.



Рис. 4.3.6. Сеточный каплеуловитель

Преимуществом сеточных каплеуловителей являются низкие энергетические затраты, простота конструкции, монтажа и обслуживания; недостатком – возможность забивания при наличии в газе твердых частиц.

Применяются сеточные каплеуловители с вертикальным и горизонтальным расположением пакетов сеток. Пакеты укладываются на опорные решетки, а сверху помещается прижимная решетка.

В каплеотбойных устройствах **решетчатого типа** (рис. 4.3.7.) воздушный поток, содержащий уносимые капли жидкости, претерпевает меньшие отклонения от своей вертикальной траектории движения в основном объеме аппарата по сравнению с каплеотбойными устройствами жалюзийного типа. Поверхность контакта у решетчатых элементов существенно менее развита, чем у жалюзийных. Поэтому, а также из-за меньшей удельной поверхности, хотя их аэродинамическое сопротивление сопоставимо с жалюзийными, решетчатые каплеотбойные устройства по эффективности каплеотбойного действия несколько уступают жалюзийным конструкциям.

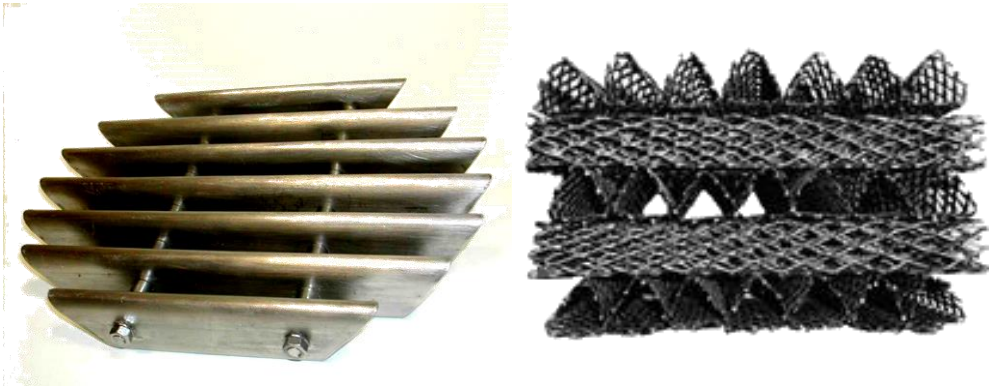


Рис. 4.3.7. Каплеуловитель решетчатого типа.

В последнее время стали появляться **каплеуловители, выполненные из геликоидных элементов** (рис. 4.3.8). Принцип действия такого каплеуловителя основан на закручивании газожидкостного потока для более эффективного его разделения. Каплеуловитель может выполняться как из горизонтально уложенных геликоидов, так и из вертикально уложенных.



а) *б)*

Рис. 4.3.8. Каплеуловитель, выполненный из геликоидных элементов

Насадочные каплеулавливающие устройства представляют собой насадочные элементы различной формы, загруженные регулярно или внавал. На рисунке 4.3.9 показаны некоторые виды нерегулярных (насыпных) насадок.

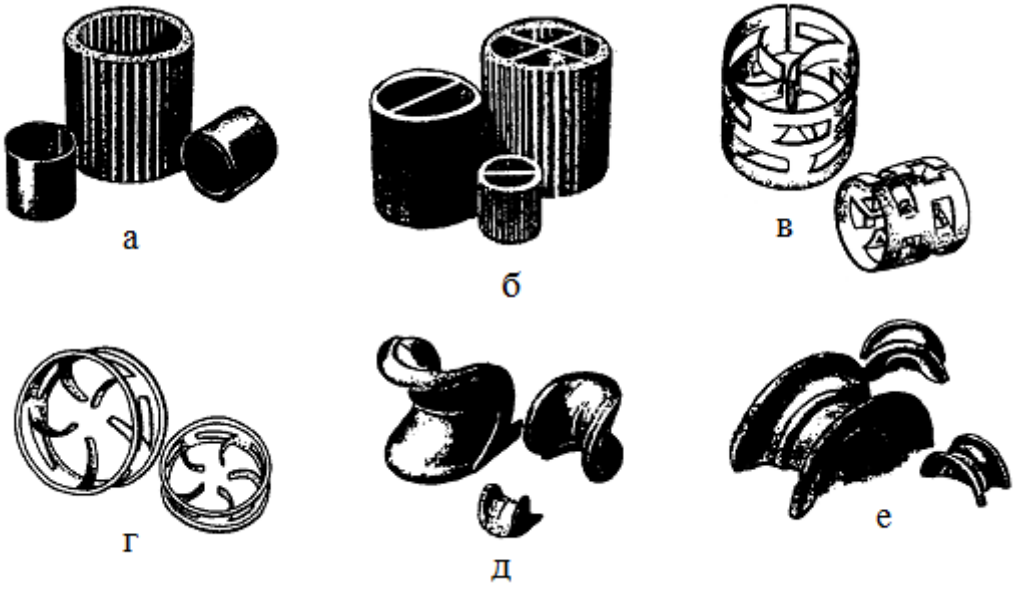


Рис. 4.3.9. Некоторые виды нерегулярных (насыпных) насадок, используемых в насадочных каплеулавливающих устройствах: а – кольца Рашига; б – кольца с перегородками; в – кольца Палля; г – миникольца; д – седла Берля; е – седла Инталокс

В процессе работы насадочных каплеуловителей капли жидкости под действием различных механизмов (в основном инерционного и турбулентного) оседают в криволинейных каналах на поверхности насадки. Образовавшаяся пленка жидкости стекает в нижнюю часть насадки и затем под действием сил гравитации выводится из насадки. При высоких скоростях газа пленка жидкости может увлекаться газовым потоком и образуется срыв и унос капель жидкости.

Можно согласиться с выдвинутой в работе [3] гипотезой о том, что чем сложнее геометрическая форма поверхности элемента каплеотбойного устройства, тем выше его эффективность. С этой точки зрения определенный интерес представляет использование насадочных каплеулавливающих устройств с насадкой в качестве каплеулавливающих элементов.

4.4. Конструкции насадочных элементов каплеулавливающих устройств

Насадочные каплеулавливающие устройства находят широкое применение в нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и других отраслях промышленности при проведении процессов абсорбции (хемосорбции), ректификации, жидкостной экстракции, охлаждения газов и жидкостей и газосепарации. Разнообразие условий работы и задач вызывают необходимость создания новых конструкций каплеулавливающих устройств и совершенствования методов их расчета. Насадка является основным функциональным элементом каплеулавливающего устройства насадочного типа, правильный выбор числа и конструкции которой гарантирует эффективность эксплуатации.

К насадочным элементам предъявляются следующие требования:

– высокоразвитая удельная поверхность;

– максимально возможная доля свободного объема;

– высокая прочность;

– низкое гидравлическое сопротивление;

– способность хорошо смачиваться жидкостью;

– обеспечение равномерного распределения жидкости и газа по сечению аппарата.

Применительно к геометрическим характеристикам насадки это означает, что удельная межфазная поверхность и доля свободного объема насадочного слоя должны быть высокими. Насадка должна исключать образование застойных зон и обеспечивать наиболее полное омывание поверхности контактирующими потоками.

Универсальной насадки, удовлетворяющей всем этим требованиям, не существует. Ряд требований является взаимоисключающими. Так увеличение удельной поверхности насадки приводит, как правило, к уменьшению доли ее свободного объема и увеличению гидравлического сопротивления.

Кроме того, насадка должна быть технологична в изготовлении и иметь низкую материалоемкость и высокую коррозионную стойкость. Часто трудность изготовления вынуждает отказаться от

внедрения высокоэффективной насадки. Насадка, обладающая достаточно хорошими технологическими характеристиками, может быть рекомендована для широкого использования, если разработана в достаточной степени простая технология ее производства.

Для изготовления насадочных контактных устройств используется довольно широкий круг материалов. Нерегулярные насадки правильной формы изготавливаются в основном из керамики, фарфора, металла, полимерных материалов, в ограниченном количестве из стекла. Выбор материала обусловлен условиями процесса и стоимостью насадки.

Особенности коррозионной среды при осуществлении технологического процесса, а также сравнительно низкая стоимость, износостойкость при контакте с потоком сырья, содержащим твердые частицы, прочность на разрыв и крипоустойчивость при высоких температурах, стойкость к окислению обуславливают широкое использование при изготовлении насадок керамических материалов.

Однако, использование керамики существенно увеличивает толщину стенки и удельный вес слоя насадки. Это ухудшает некоторые характеристики насадки – увеличивает насыпной вес. В то же время большая шероховатость и лучшая смачиваемость керамической насадки способствуют зацеплению капель жидкости на поверхности насадки, тем самым положительно влияя на процесс каплеулавливания.

В качестве полимерных материалов применяемых для изготовления насадок используют преимущественно полипропилен и полиэтилен низкого давления высокой плотности. Эти материалы устойчивы в щелочных средах до величины pH 12. Однако использование их ограничено по термостойкости: полиэтилен до 50 °С, полипропилен до 80 °С. Недостатком насадок из полимерных материалов является плохая смачиваемость и высокая стоимость по сравнению с насадками из керамики.

Для изготовления насадок также применяют графит, стекло и резину.

Многие насадки изготавливают из металлов, преимущественно из углеродистой и нержавеющей сталей, реже из алюминия. Они имеют наименьшую толщину стенки, по сравнению с

насадками из других материалов. Однако поверхность металлических насадок хуже смачивается и в некоторых средах не является коррозионностойкой. Стоимость металлических насадок выше стоимости насадок из других материалов.

Большую группу образуют, так называемые, кольцевые насадки, представляющие собой тонкостенные кольца, наружный диаметр которых обычно равен высоте кольца. Диаметр насадочных колец изменяется от 15 до 150 мм (кольца меньшего и большего диаметра не находят применения в промышленной практике). В настоящее время в промышленности применяются как регулярные (правильно уложенные) так и нерегулярные (засыпаемые внавал) насадки (рис. 4.4.1). Преимуществом регулярной укладки является меньшее гидравлическое сопротивление, однако она более чувствительна к равномерности орошения.

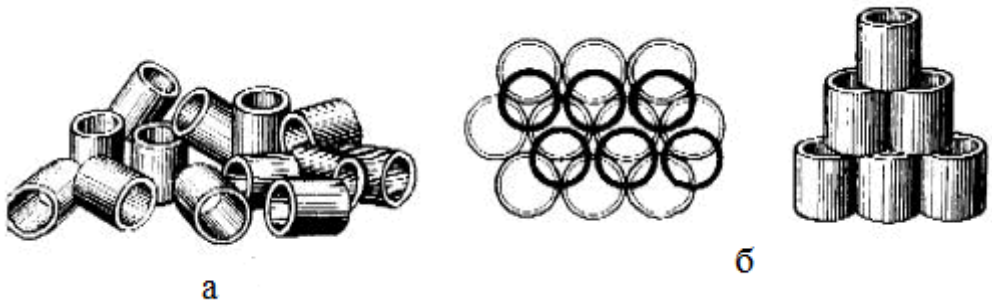
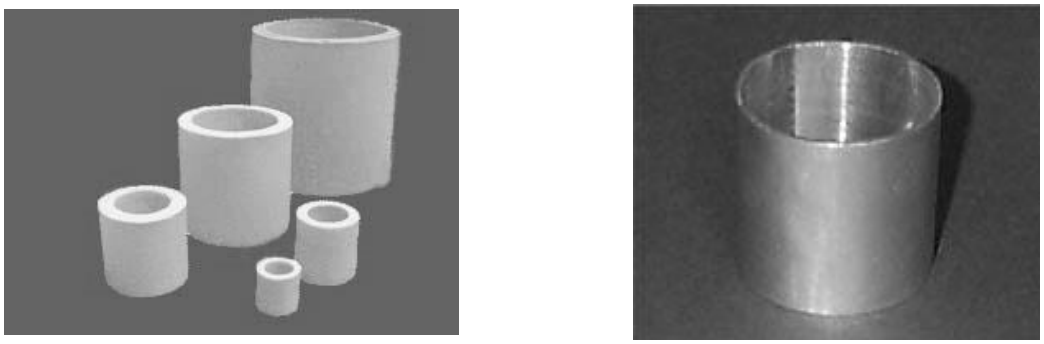


Рис. 4.4.1. Способы укладки кольцевой насадки:
а – кольца Рашига, уложенные нерегулярно (внавал);
б – кольца Рашига, уложенные регулярно

Рассмотрим новые наиболее распространенные в промышленности типы насадок, которые могут применяться в каплеулавливающих устройствах и особенности их конструкций.

Наиболее широкое распространение в промышленности долгое время имели кольца Рашига (тонкостенные полые цилиндры с диаметром, равным высоте) (рис. 4.4.2). Основным достоинством колец Рашига является простота изготовления и дешевизна, а недостатком – малая удельная поверхность.

Дальнейшее совершенствование насадок идет по пути устранения указанных недостатков.



а *б*

Рис. 4.4.2. Кольца Рашига:
а – керамические, б – металлические

Для устранения данного недостатка начали разрабатывать и применять насадки других типов.

Перфорированные кольца. Перфорирование улучшает омываемость внутренней поверхности элемента, снижает гидравлическое сопротивление.

Широкое промышленное применение в настоящее время нашли кольца Палля (рис. 4.4.3.). Такая конструкция позволяет увеличить пропускную способность по сравнению с кольцами Рашига в 1,2 раза, снизить гидравлическое сопротивление при различных режимах течения в 1,6–4 раза, увеличить эффективность на 25 %. Недостатками данного конструктивного решения являются сложность изготовления и стоимость.



а *б* *в*

Рис. 4.4.3. Кольца Палля:
а – керамические; б – металлические; в – пластиковые

В ГИАПе была разработана насадка ГИАП–Н3 (рис. 4.4.4) превосходящая на 15 % по эффективности кольца Палля и имеющая на 25 % меньшее сопротивление. Насадка представляет собой

два перфорированных полукольца соединенных между собой перегородкой.



Рис. 4.4.4. Насадка типа ГИАП–Н3

Кольца с внутренними перегородками (рис. 4.4.5). Такое конструктивное решение увеличивает удельную поверхность, но при этом уменьшает свободный объем слоя насадки, что, как правило, приводит к увеличению гидравлического сопротивления, усложняет изготовление, увеличивает стоимость.

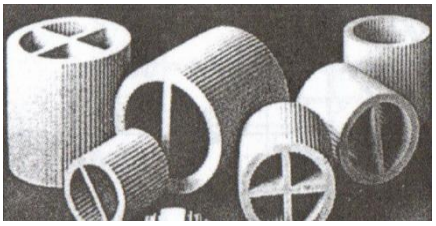


Рис. 4.4.5. Кольца с перегородками

Для увеличения удельной поверхности насадки кольца могут производиться **рифленые и гофрированные** (рис. 4.4.6). В данном случае каналы переменного сечения также позволяют увеличить свободный объем насадки и снизить гидравлическое сопротивление.

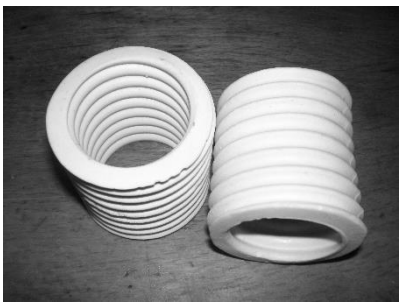


Рис. 4.4.6. Гофрированные кольца

Превращение кольца в мини-кольцо делает внутреннюю поверхность более доступной для смачивания. Выполнение насадки с величиной отношения ее максимального диаметра к высоте в пределах 4–6 (рис 4.4.7) обеспечивает самоориентацию насадки при ее загрузке внавал, малое гидравлическое сопротивление и развитую удельную поверхность [1].

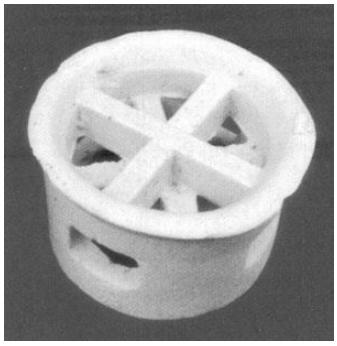
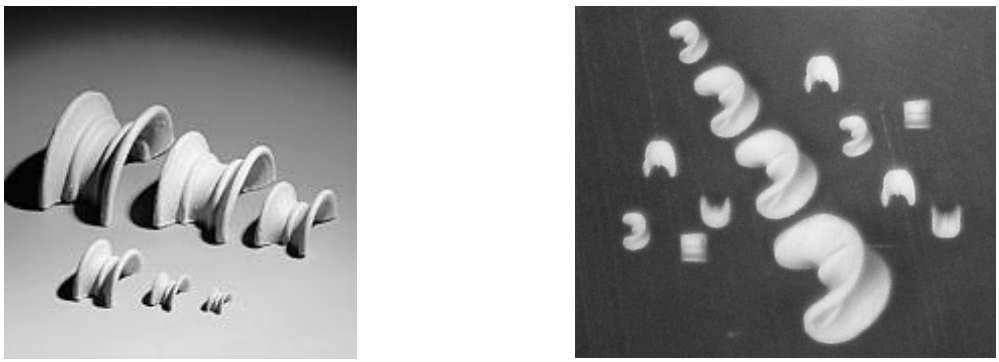


Рис. 4.4.7. Мини-кольцевая насадка

Седловидные насадки. Наиболее известные из них – седла Инталокс (рис. 4.4.8, а) и седла Берля (рис. 4.4.8, б). Седла Инталокс по сравнению с кольцами Палля имеют большую на 7 % эффективность, большую на 10–30 % пропускную способность и вдвое меньшее гидравлическое сопротивление.



а *б*

Рис. 4.4.8. Седловидные насадки:
а – седла Инталокс, б – седла Берля

Спирально-винтовые конструкции (рис. 4.4.9) [1]. Интенсификация массообмена происходит путем увеличения удельной поверхности, зазоры в цилиндрическом корпусе позволяют создать

хорошую аэродинамичность и турбулизацию потоков газа и жидкости на внутренней и внешней рабочих поверхностях, дополнительное винтовое направление течения потоков также способствует интенсификации процесса, за счет центробежных сил основная часть капель оттесняется к стенке и стекает под воздействием массовых сил обратно в аппарат. Недостатком таких насадок является сложность изготовления.

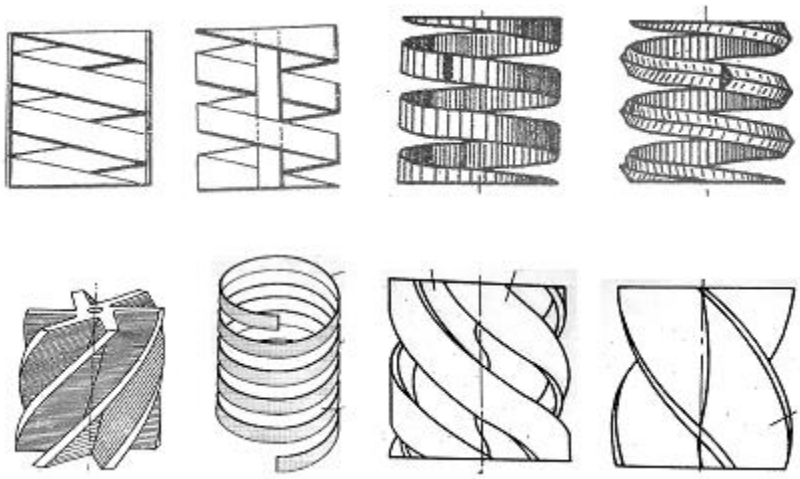


Рис. 4.4.9. Спирально-винтовые насадки

В последние годы появилось большое количество конструкций нерегулярных насадок, которые имеют новую, произвольную форму [1].

Насадка фирмы «Raschig GmbH» – суперкольца. Такая насадка имеет большую удельную поверхность и большой свободный объем (рис. 4.4.10.).



Рис. 4.4.10. Нерегулярные насадки с большой поверхностью контакта

Неупорядоченная насадка «Инжехим» (рис. 4.4.11) – отличается технологичностью изготовления, простотой конструкции и обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление.

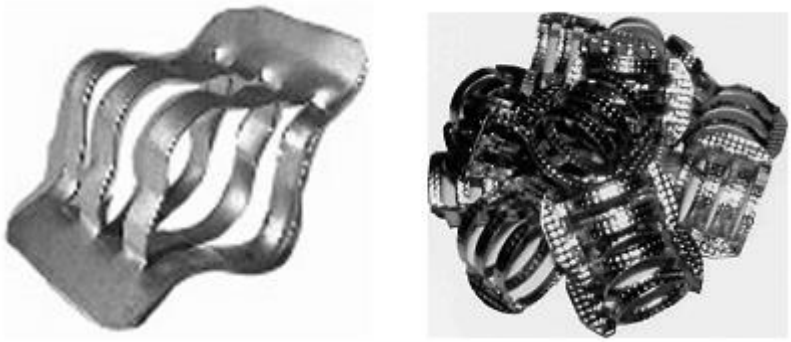


Рис. 4.4.11. Насадка «Инжехим-2000»

Как показывает опыт отечественных и зарубежных фирм, при решении задач модернизации оборудования очень часто только заменой контактных устройств можно добиться значительного повышения эффективности проводимых процессов, снизить энергозатраты на единицу продукции.

Анализ конструкций насадок различного типа, показывает следующее. Перфорация элементов насадки обеспечивает более равномерное распределение и перераспределение жидкости и газовой фазы, более полное использование геометрической поверхности насадки, а также более интенсивное обновление поверхности контакта фаз. Всевозможные завихрители, лопасти, выступы и прочие конструктивные элементы насадки способствуют турбулизации жидкости, ее диспергированию, завихрению потоков газа. При этом, однако, неминуемо увеличивается гидравлическое сопротивление и снижается предельная нагрузка. Поэтому работы по увеличению эффективности каплеулавливания следует вести в направлении поиска таких оптимальных конструктивных решений насадки, которые, максимально увеличивая эффективность, одновременно минимально увеличивали бы гидравлическое сопротивление.

Целесообразны такие конструктивные приемы, как нанесение на поверхность элементов насадки гофр или ее рифление с целью удлинения пути потоков, то есть развитие поверхности контакта взаимодействующих фаз, дополнительная турбулизация потоков.

Снабжение элементов насадки перегородками и другими дополнительными внутренними поверхностями увеличивает механическую прочность элементов и способствует развитию поверхности контакта фаз.

Анализ конструкций нерегулярных насадок, созданных в последние годы, показывает, что каждое новое конструктивное решение дает незначительный выигрыш в пропускной способности и гидравлическом сопротивлении, и еще в меньшей степени – в эффективности. Попытки увеличить эффективность за счет развития геометрической поверхности элементов ведут к снижению пропускной способности и усложнению конструкции. В то же время стремление увеличить пропускную способность и улучшить омываемость всей поверхности элемента путем его перфорирования ведет к снижению эффективности улавливания капель. Таким образом, в настоящее время актуальна задача поиска таких новых конструктивных решений, которые при сохранении или некотором улучшении основных показателей будут просты и дешевы при крупносерийном производстве.

4.5. Основные характеристики насадок

Геометрические характеристики насадок

Важными параметрами насадок при их использовании в качестве каплеуловителей являются их геометрические характеристики. В первую очередь к ним относят размеры насадочных элементов, удельную поверхность, свободный объем, количество насадочных элементов в единице объема. С одной стороны, необходимо максимально развить геометрическую поверхность элементов насадки. Однако, увеличение удельной поверхности насадки в единице объема неизбежно вызывает увеличение гидравлического сопротивления, что ухудшает энергетические показатели технологического процесса. Здесь следует отметить, что увеличение геометрической удельной поверхности далеко не всегда приводит к увеличению реальной поверхности насадки, которая активно участвует в осуществлении технологического процесса. Определенная часть геометрической поверхности насадки

может быть балластной и не участвовать по тем или иным причинам в осуществлении технологических процессов. Очевидный пример – наличие застойных зон, как правило, жидкой фазы. Именно этот недостаток имеют большинство наиболее распространенных промышленных насадок, как нерегулярных, так и регулярных.

В табл. 4.5.1.1 представлены основные характеристики наиболее часто используемых нерегулярных насадок, приведенные в разных литературных источниках.

Таблица 4.5.1.1

Основные характеристики нерегулярных насадок

№ п/п	Тип насадки, материал	Размеры насадки, мм	Удельная поверхность, $м^2/м^3$	Свободный объем, $м^3/м^3$	Число элементов в 1 $м^3$ внавал	Удельная материалоемкость, $кг/м^3$
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	Кольца Рашига, керамика	10x10x1,5	440	0,65	378000	840
		15x15x2	330	0,7	220000	690
		20x20x2,2	240	0,73	95000	650
		25x25x3	195	0,75	46000	600
		25x25x3	200	0,74	50000	530
		30x30x3,5	165	0,76	25000	570
		35x35x4	135	0,78	18500	520
		35x35x4	140	0,78	18000	530
		50x50x5	90	0,785	6000	530
		50x50x5	95	0,79	5800	500
		50x50x5	96	0,78	6000	500
		60x60x6	78	0,78	3350	520
		60x60x8	78	0,74	3300	630
		80x80x8	60	0,78	1530	535
		80x80x10	60	0,77	1530	560
		100x100x10	44	0,81	750	450
		120x120x12	35	0,82	450	420
2	Кольца Рашига, сталь	8x8x0,3	630	0,9	900000	750
		10x10x0,5	500	0,88	770000	960
		15x15x0,5	350	0,92	240000	660
		25x25x0,8	220	0,92	55000	640
		50x50x1	110	0,95	7000	430
3	Кольца Палля, керамика	25x25x3	220	0,74	48000	610
		25x25x3	220	0,74	46000	610
		35x35x4	165	0,76	14300	540
		35x35x4	165	0,76	18500	540
		50x50x5	120	0,78	5800	520
		50x50x5	120	0,78	6000	520

Продолжение табл. 4.5.1.1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
		60x60x6 80x80x8 100x100x10	96 – 55	0,79 – 0,81	3350 – 750	520 620 500
4	Кольца Палля, сталь	15x15x0,4 25x25x0,6 35x35x0,8 38x38x0,8 50x50x1	380 235 170 149 108	0,9 0,9 0,9 0,946 0,9	230000 52000 18200 13000 6400	525 490 455 424 415
5	Кольца Палля, пластик	15x15 25x25 25x25x3 35x35 50x50	380 237 220 170 108	0,9 0,9 0,73 0,9 0,9	230000 52000 – 18200 6400	85 80 – 75 70
6	Седла Интал-локс, керамика	12 12,5 19 20 20x2 25 25 25x2,5 35x4,5 38 38 50 50 50x6 60x30x4 80x42x6 90	522 625 335 390 300 255 255 250 165 166 195 118 120 110 131 105,4 85	0,73 0,78 0,77 0,74 0,73 0,74 0,775 0,75 0,74 0,75 0,81 0,79 0,77 0,75 0,804 0,791 0,79	740000 730000 229000 230000 210000 84000 84000 84000 22700 25000 25000 9350 9300 8800 19680 8234 1800	700 545 560 660 640 630 545 610 670 620 480 530 580 610 502 470 580
7	Седла Берля, керамика	12,5 20x2 25 25x2.5 35x4,5 38 50x6	460 310 260 250 155 165 115	0,68 0,69 0,69 0,7 0,75 0,7 0,77	570000 190000 78000 79000 22000 30500 8800	720 800 670 720 610 670 640
8	Седла Берля, сталь	25	250	0,93	-	-
9	Кольцо с пере-крестной перего-родкой, керамика	50x50x5 50x50x5 80x80x8 100x100x10 120x120x12 150x150x15	126 – – – – –	0,645 – – – – –	6000 – – – – –	810 520 780 750 700 680

Окончание табл. 4.5.1.1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
10	Кольца Лессинга, керамика	50x50x5	118	0,66	6000	–
11	Кольца Лессинга, сталь	50x50x1	108	0,9	6000	-
12	Супер-кольца Рашига, сталь	0,3 0,5 0, 1 1,5 2 3	315 250 180 150 120 100 80	0,96 0,97 0,98 0,98 0,98 0,98 0,98	180000 145000 45500 32000 13100 9500 4300	340 275 185 165 170 165 150

Зависимость удельной поверхности насадки от порозности, для насыпных насадок из керамики и металла, построенная по данным различных авторов, представлена на рис. 4.5.1.1.

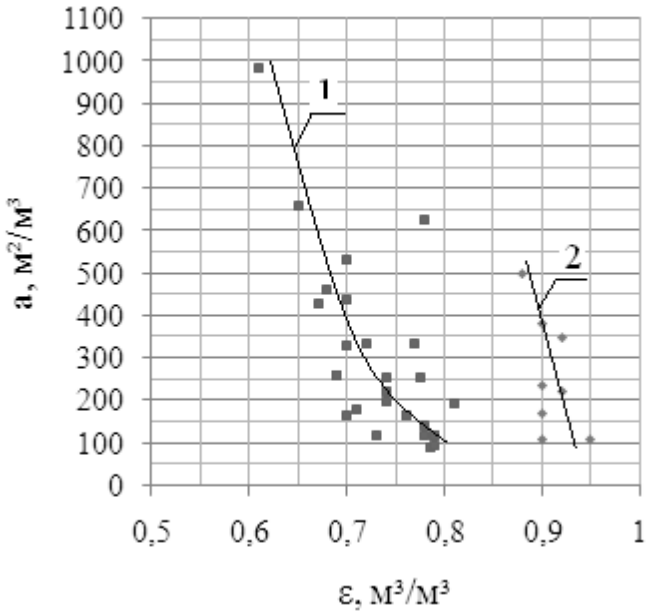


Рис. 4.5.1.1. Зависимость удельной поверхности насадки от величины порозности для керамических и металлических насыпных насадок: 1 – керамические насыпные насадки (кольца Рашига, кольца Палля, седла Инталокс, седла Берля); 2 – металлические насыпные насадки (кольца Рашига, кольца Палля, седла Инталокс, седла Берля)

Наблюдаемый разброс объясняется различной геометрической формой представленных на рисунке насадок. Данные по насыпным насадкам из керамики и металла существенно различаются между собой и описываются различными кривыми. Следует отметить, что при увеличении величины геометрической удельной поверхности насыпных насадок значительно снижается значение порозности, что одновременно приводит к снижению величины эквивалентного диаметра.

При этом, для металлических насыпных насадок, зависимость удельной поверхности насадки от величины порозности носит близкий к линейному характер. В целом, из-за большей толщины стенок керамических насадок, эти насадки отличаются меньшими значениями величины порозности.

Опытные данные по регулярно уложенным кольцевым, хордовым и структурированным насадкам показаны на рис. 4.5.1.2. Характерно, что зависимость удельной поверхности насадки от величины порозности для регулярно уложенных кольцевых и структурированных насадок носит линейный характер, автомодельный по величине порозности.

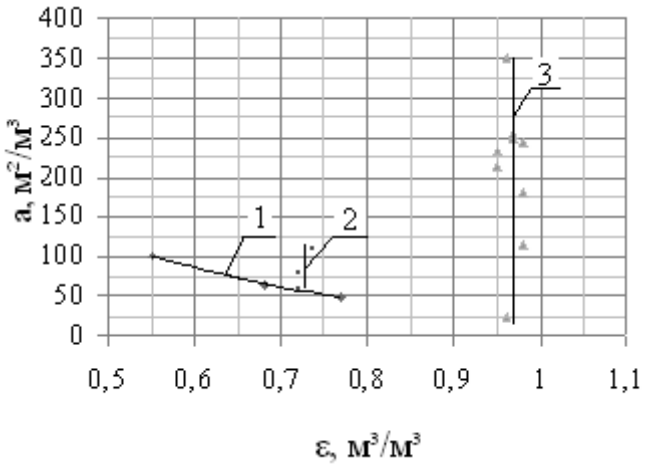


Рис. 4.5.1.2. Зависимость удельной поверхности насадки от величины порозности для регулярно уложенных кольцевых, хордовых и структурированных насадок: 1 – деревянная хордовая насадка; 2 – регулярно уложенные керамические кольца Рашига; 3 – регулярные металлические структурированные насадки

Эквивалентный диаметр насадки определяется по зависимости (1.5.1), напомним её:

$$d_э = \frac{4\varepsilon}{a}, \qquad (4.5.1.1)$$

4.6. Задержка жидкости и коэффициент смачиваемости поверхности насадочного слоя

Для расчета эффективности насадочных сепараторов необходимо иметь выражение для расчета коэффициента смачиваемости ψ_W и коэффициента задержки жидкости $\varepsilon_{ж}$.

Количество удерживаемой жидкости $\varepsilon_{ж}$ складывается из статической $\varepsilon_{ж.ст}$ и динамической $\varepsilon_{ж.д}$ составляющих.

$$\varepsilon_{ж} = \varepsilon_{ж.ст} + \varepsilon_{ж.д}, \qquad (4.6.1)$$

Статическая составляющая представляет собой количество жидкости, удерживаемой на насадке капиллярными силами, эта величина не зависит от гидродинамических условий и определяется формой и материалом насадки, а также свойствами орошаемой жидкости. Динамическая составляющая – количество жидкости, движущейся по насадке, определяется гидродинамическими условиями и формой насадочных элементов.

Расчет динамической составляющей представлен в работе [1].

При пленочном режиме работы колонны ниже точки подвисания (смотри раздел 4.7) в большинстве случаев не вся поверхность насадки смочена жидкостью. Зависимость доли смоченной поверхности насадочных элементов от конструктивных параметров определяется экспериментально. Доля смоченной поверхности характеризуется **коэффициентом смачиваемости**:

$$\psi_w = a_w / a \qquad (4.6.2)$$

отношением поверхности смоченной жидкости a_w, к геометрической поверхности – a. Экспериментальные данные представлены в работе [7].

Для расчета насадочных аппаратов может использоваться эквивалентный диаметр насадки $d_э$, определяемый с учетом ψ_w и $\varepsilon_{ж}$, по формуле:

$$d_э = \frac{4(\varepsilon - \varepsilon_{ж})}{a \cdot \psi_w} \qquad (4.6.3)$$

4.7. Методы расчета эффективности каплеулавливания

Существует несколько способов определения эффективности каплеулавливающих устройств. Однако не все они дают удовлетворительные результаты или могут считаться приемлемыми, так как не всегда возможно определить все параметры, входящие в расчетную зависимость, например, диаметр дисперсных частиц, концентрацию на входе и выходе из аппарата, скорость потока, перепад давления и т.д.

Как известно, существуют гравитационные, инерционные, центробежные и другие механизмы осаждения. Работа большинства промышленных аппаратов основана на совмещении различных принципов осаждения. Соответственно эффективность осаждения зависит от различных параметров.

Коэффициент осаждения частиц под действием гравитационных сил описывается зависимостью вида:

$$\eta = f\left(\mathrm{Re}; \frac{\mathrm{Stk}}{\mathrm{Fr}}\right), \qquad (4.7.1)$$

Эффективность центробежного улавливания выражается зависимостью:

$$\eta = f\left(\mathrm{Re}; \mathrm{Stk}; \mathrm{Fr}\right), \qquad (4.7.2)$$

Эффективность осаждения при зацеплении определяется зависимостью:

$$\eta = f\left(\mathrm{Stk}; \frac{\mathrm{Stk}}{\mathrm{Fr}}\right), \qquad (4.7.3)$$

где Stc – критерий Стокса, Fr– критерий Фруда.

В турбулентном потоке на характер движения частиц оказывают влияние турбулентные пульсации. Расчеты показывают, что

практически полное вовлечение частиц в пульсации происходит при времени релаксации частиц $\tau_р \leq 0{,}01$, т.е. при размере частиц менее 60 мкм с плотностью 1000 кг/м^3. Более крупные частицы практически не участвуют в пульсациях среды.

Для расчета эффективности каплеулавливания при турбулентном движении газового потока предложено [4] использовать формулу, аналогичную формуле Дейча:

$$\eta = 1 - \exp\left(-4 \frac{\omega_{\text{ЧТУРБ}}}{\omega_{\text{К}}} \cdot \frac{H}{d_{\text{Э}}} \right), \qquad (4.7.4)$$

где $\omega_{\text{ЧТУРБ}}$ – скорость турбулентного осаждения взвешенных частиц (капель), м^2/с; $\omega_{\text{К}}$ – скорость газового потока, отнесенная к полному сечению пустого аппарата, м/с; H – высота слоя насадки, м; $d_э$– эквивалентный диаметр насадки, м.

Для ламинарного режима эффективность каплеулавливания рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{\xi}{3} \cdot \frac{H}{d_{\text{Э}}} \right), \qquad (4.7.5)$$

Эффективность каплеулавливания может быть определена также по содержанию капель до поступления в газоочистной аппарат и на выходе из него [1]:

$$\eta = \frac{G_{\text{К}}^{\text{ВХ}} - G_{\text{К}}^{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{К}}^{\text{ВХ}}} = \frac{V_{\text{Г}}^{\text{ВХ}} \cdot c^{\text{ВХ}} - V_{\text{Г}}^{\text{ВЫХ}} \cdot c^{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{Г}}^{\text{ВХ}} \cdot c^{\text{ВХ}}} = 1 - \frac{V_{\text{Г}}^{\text{ВЫХ}} \cdot c^{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{Г}}^{\text{ВХ}} \cdot c^{\text{ВХ}}}, \qquad (4.7.6)$$

где $G_{\text{К}}^{\text{ВХ}}$, $G_{\text{К}}^{\text{ВЫХ}}$ – массовый расход частиц (капель) соответственно на входе и выходе из аппарата, кг/с;

$V_{\text{Г}}^{\text{ВХ}}$, $V_{\text{Г}}^{\text{ВЫХ}}$ – объемный расход газа соответственно на входе и выходе из аппарата, м^3/с;

$c^{\text{ВХ}}$, $c^{\text{ВЫХ}}$ – концентрация частиц (капель) в газе соответственно на входе и выходе из аппарата, кг/м^3.

Эффективность улавливания капель по количеству уловленных капель и их концентрации в газе, выходящего из аппарата можно рассчитать по уравнению:

$$\eta = \frac{G_{\text{К}}}{G_{\text{К}} + V_{\text{Г}}^{\text{ВЫХ}} \cdot c^{\text{ВЫХ}}}, \qquad (4.7.6)$$

Эффективность улавливания капель может быть выражена в виде коэффициента проскока капель жидкости $\xi_{\text{П}}$, который представляет собой отношение концентрации капель жидкости выходящих из аппарата вместе с потоком газа к их концентрации перед ним.

$$\xi_{\text{П}} = 1 - \eta, \qquad (4.7.7)$$

Улавливание частиц жидкости, уносимых газовым потоком, осуществляется в слое насадки главным образом за счет сил инерции. При движении через слой насадки капли сталкиваются с элементами насадки и оседают на них.

При турбулентном движении газового потока эффективность улавливания содержащихся в нем капель можно рассчитать по уравнению:

$$\eta = 1 - \exp\left(2p \cdot n \cdot \text{Stk}\right), \qquad (4.7.8)$$

где n – число полных поворотов вокруг препятствий по всей толщине насадки; Stk – критерий Стокса.

Критерий Стокса Stk, или инерционный параметр, характеризует меру отношения инерционной силы, действующей на каплю, к силе гидравлического сопротивления среды и рассчитывается по формуле:

$$\text{Stk} = \frac{\omega_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{К}} \cdot d_{\text{К}}^2}{18\mu_{\text{Г}} \cdot b}, \qquad (4.7.9)$$

где b – условная ширина в насадке, которая зависит от диаметра элемента и принимается равной 0,1 $d_{\text{Н}}$;

$\mu_{\text{Г}}$ – коэффициент динамической вязкости газа, Н·с/м^2;

$d_{\text{К}}^2$ – диаметр капли, м;

$\rho_К$ – плотность капли, кг/м^3.

Для вертикального слоя число полных поворотов вокруг препятствий по всей толщине насадки *n* рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{H}{2d_Н}, \qquad (4.7.10)$$

где $d_Н$ – наружный диаметр насадки, м.

Для жалюзийных каплеуловителей волнистого профиля эффективность каплеулавливания можно определить по формуле [1]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{360} \cdot c_1 \cdot \Sigma\Theta \cdot \mathrm{Stk} \cdot \xi^{2/3} \right), \qquad (4.7.11)$$

где c_1 – коэффициент, учитывающий увеличение эффективности за счет неравномерности полей скоростей в каналах каплеуловителя и осаждения частиц в зонах отрыва потоков;

ξ – коэффициент сопротивления;

$\Sigma\Theta$ – сумма углов поворота потока в межжалюзийном канале, м/с.

Значение каплеуноса после каплеуловителя, т.е. концентрация капель на выходе из сепаратора, определяется по формуле:

$$\eta_{К\cdot у.} = \eta_0 \left(1 - \eta_\Sigma\right), \qquad (4.7.12)$$

где η_0 – начальная концентрация капель; η_Σ – суммарная степень очистки.

По результатам данного выражения можно судить о том, удовлетворяют ли поставленным задачам полученное значение концентрации капель на выходе из сепаратора, т.е. насколько эффективен процесс сепарации.

4.8. Разработка новых типов насадки и каплеулавливающих устройств

Каплеулавливающие устройства широко используются в химической, других отраслях промышленности и в энергетике. В

связи с возрастающими требованиями по охране окружающей среды от загрязнений и вредных выбросов капель жидкости в атмосферу, появляется необходимость в разработке новых и усовершенствовании существующих конструкций каплеулавливающих устройств.

Улавливание капель жидкости из газового потока в слое нерегулярно уложенной насадки осуществляется главным образом за счет сил инерции. При движении через слой насадки капли сталкиваются с элементами насадки и оседают на них. Важными параметрами насадок при их использовании в качестве каплеуловителей являются их геометрические характеристики, а также величина коэффициентов гидравлического сопротивления.

В учебнике [5] для расчета эффективности улавливания капель была предложена расчетная формула:

$$\eta = 1 - \exp\left[-1{,}44 \cdot \frac{1}{d_э} \cdot \left(\frac{H}{\omega_К} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot \nu_Г}{\rho_Г} \right)^{0,25} \right] \qquad (4.8.1)$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр насадки, м;

$\rho_Г$ – плотность газа, кг/м^3;

$\omega_К$ – средняя скорость газа в расчете на полное сечение пустого аппарата, м/с;

ΔP – перепад давления в слое насадки, Па;

H – высота слоя насадки, м.

Из формулы (4.8.1) следует, что величина эквивалентного диаметра важна для процесса каплеулавливания. Из формулы (1.5.1) следует, что увеличение удельной поверхности для всех типов насадок приводит к снижению величины эквивалентного диаметра канала, а это ведёт к заметному снижению величины порозности. Поэтому, чем меньше элементы насадки, тем большую эффективность каплеотбойного действия можно ожидать. Однако, при этом, существенно возрастает и гидравлическое сопротивление, как это следует из уравнения (2.2) для расчета удельного сопротивления сухой насадки.

Понятно, что уменьшение величины порозности приводит к росту сопротивления, а это связано с увеличением энергозатрат.

Поэтому целесообразно изменять, прежде всего, форму насадки, а не ее размеры.

4.9. Описание конструкции разработанной новой кольцевой керамической насадки типа N3C. Геометрические характеристики

Как уже было отмечено, актуальной задачей является защита окружающей среды от капельных выбросов, экономия сырья и защита оборудования. Поставленная задача может быть достигнута путем совершенствования каплеулавливающих устройств, выполненных из слоя нерегулярно уложенной керамической кольцевой насадки. В основу данной задачи входит разработка новой конструкции керамической кольцевой насадки, которая будет совмещать в себе низкое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность улавливания капель жидкости.

В Московском государственном университете инженерной экологии, который в настоящее время входит в состав Московского политехнического университета, была разработана и предложена новая конструкция нерегулярной керамической кольцевой насадка типа N3C, которая защищена патентом на полезную модель №95555 зарегистрированным в Государственном реестре полезных моделей РФ 10.07.2010. Общий вид нерегулярной керамической кольцевой насадка типа N3C представлен на рис. 4.9.1.

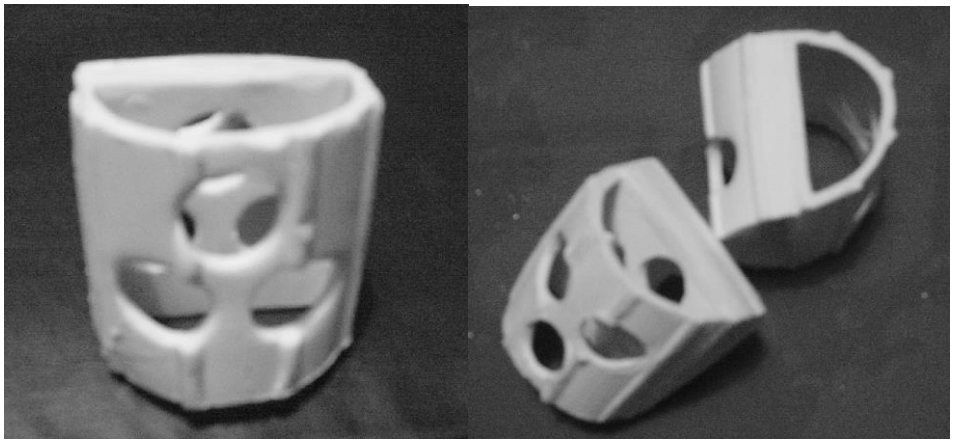


Рис. 4.9.1. Общий вид новой керамической насадки типа N3C

Насадка типа N3C представляет собой два полукольца объединенных между собой перегородкой, она снабжена гофрами по образующей каждого полукольца. В полукольцах и перегородке насадки выполнены сквозные отверстия, что способствует более равномерному распределению потока газа и позволяет увеличить извилистость канала, тем самым повысить эффективность каплеулавливания. Выполнение насадки типа N3C из керамики позволяет существенно снизить ее стоимость при серийном производстве, а также повысить коррозионную стойкость.

Аналогом при разработке новой конструкции насадки из керамики была использована насадка типа ГИАП-Н3 (рис. 4.9.2), которая представляет собой два полукольца, соединенных квадратной перегородкой и повернутых друг относительно друга на 90°. На каждом полукольце имеется зазор, расположенный в середине полукольца.



Рис. 4.9.2. Аналог новой насадки N3C – насадка ГИАП-Н3

Недостатками данной насадки является недостаточная турбулизация, эффективность, жесткость, коррозионная стойкость в агрессивных средах, высокая стоимость.

Разработанная насадка из керамики выполнена в виде двух полуколец 1 и 2, соединенных между собой перегородкой 3. В отличие от аналога полуцилиндры и перегородка соединены без зазора, что способствует повышению жесткости. В полуцилиндрах и перегородке выполнены сквозные отверстия круглой формы 4. Данное конструктивное решение способствует достижению поставленной задачи снижения гидравлического сопротивлении и дости-

жения высокой эффективности путем совмещения высокой пропускной способности и извилистости канала. В отличие от аналога, новая керамическая насадка снабжена выступами 5 по образующей каждого полукольца, что способствует увеличению извилистости канала и улучшению ориентации насадки при укладке в аппарат (рис. 4.9.3.). Наличие у насадки сквозных отверстий круглой формы и равномерно расположенных продольных выступов позволяет увеличить удельную поверхность насадки и создать дополнительные местные завихрения жидкостного и газового потока, улучшить условия для межфазного разделения, что приводит к повышению эффективности, а также повышению жесткости.

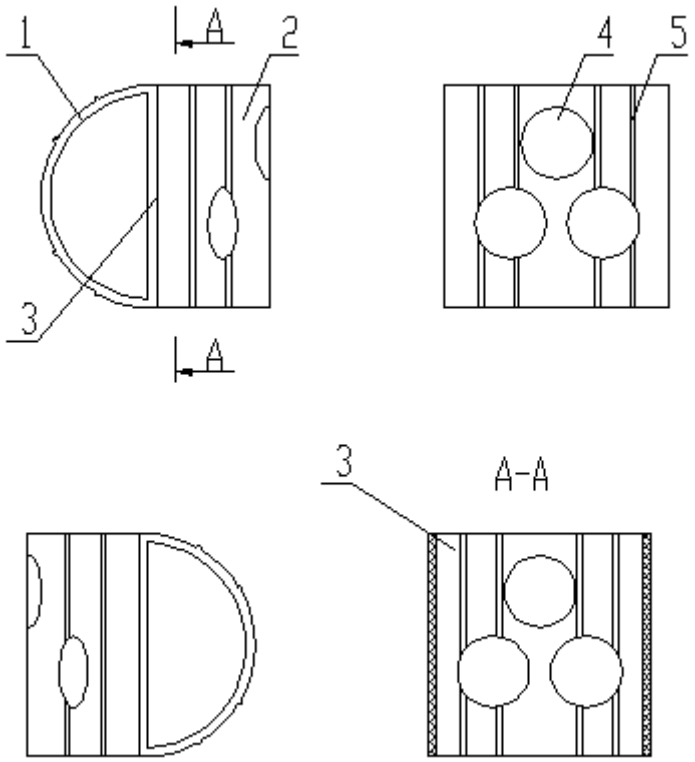


Рис. 4.9.3. Новая керамическая насадка типа N3C

Основные технические показатели новой керамической насадки приведены в таблице 4.9.1.

Таблица 4.9.1

Основные технические показатели новой керамической насадки N3C

Тип насадки	Толщина стенки, мм	Число элементов в 1м^3, штук внавал	Удельная материалоемкость, кг/м^3	Доля свободного объема, (порозность) м^3/м^3	Удельная площадь поверхности, м^2/м^3
N3C	5	4350	380,4	0,88	97

Каплеулавливающее устройство, выполненное из слоя новой керамической насадки (рис. 4.9.4.), должно обеспечивать необходимую эффективность при достаточно малых высотах слоя насадки, т.к. это напрямую связано с габаритами аппарата и гидравлическим сопротивлением. Решение поставленной цели достигается за счет определения оптимальной высоты насадочного слоя, которая будет обеспечивать необходимую достаточную эффективность при этом не создавая высокое гидравлическое сопротивление.



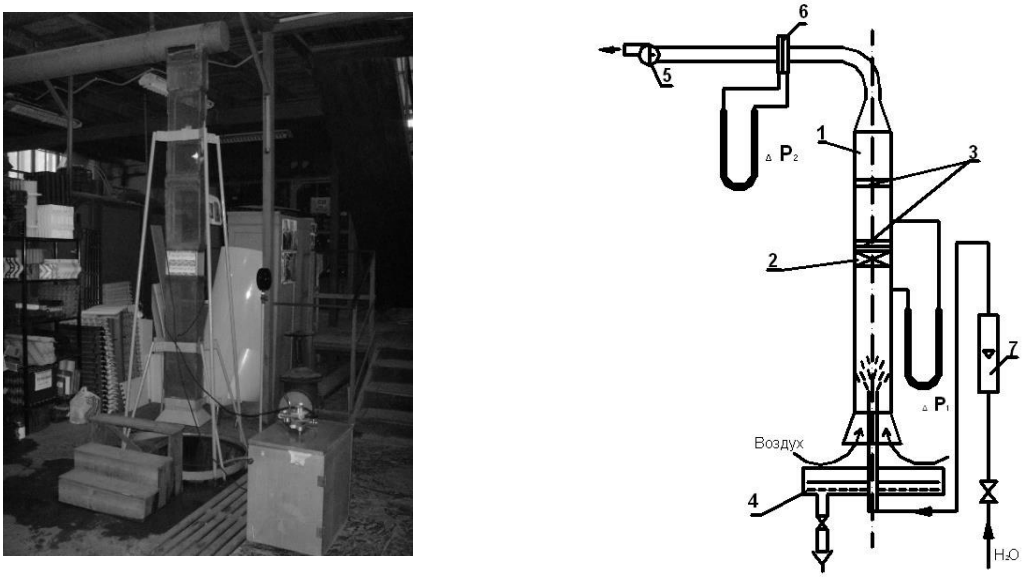
Рис. 4.9.4. Каплеуловитель выполненный из слоя нерегулярно уложенной керамической насадки типа N3C

4.10. Экспериментальная установка для исследования каплеулавливающих и гидравлических свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C

Испытания каплеулавливающего устройства проводились на установке ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

Установка представляла собой вертикальную аэродинамическую шахту прямоугольного сечения, длиной 3,0 м, присоединен-

ную с помощью конфузора к всасывающему воздуховоду вентилятора (рис. 4.10.1). Сама шахта выполнена из оргстекла, что позволяет вести визуальное наблюдение за работой каплеулавливающего устройства во время проведения испытания и, при желании, контролировать процесс распределения воздушно-капельного потока в шахте и элементах каплеулавливающего устройства. Шахта состоит из двух независимых частей, каждая из которой закреплена кронштейнами в соответствующей стойке. Верхняя и нижняя части шахты могут перемещаться при необходимости в горизонтальной и вертикальной плоскостях, для удобства установки каплеулавливающего устройства.



а) общий вид стенда *б) схема стенда*

Рис. 4.10.1. Экспериментальная установка для исследования каплеулавливающих свойств насадки:
1 – корпус аппарата; 2 – каплеуловливающее устройство;
3 – каплеулавливающая кассета; 4 – поддон; 5 – вентилятор;
6 – диафрагма; 7 – ротаметр

Верхняя часть шахты соединена с отводящим воздуховодом и имеет специальное окно для установки кассеты, содержащей наполнитель для захвата и фиксации капель, для замера величины капельного уноса (рис. 4.10.2). В качестве наполнителя для кассеты используются мелко нарезанные кусочки поролона размером 10х10х10 мм.



а) верхняя часть шахты с установленной кассетой

б) кассета с каплеулавливающим наполнителем

Рис. 4.10.2. Установка кассеты с каплеулавливающим наполнителем в экспериментальной установке

Нижняя часть шахты служит для равномерного входа воздушного потока и крепления форсунки, создающей мелкодисперсный капельный поток (рис. 4.10.3). Объем подаваемой жидкости на форсунку регулируется вентилем. Форсункой обеспечивается величина капельного потока от 20 до 90 г/м^3 при изменении напора воды перед ней от 0,1 до 0,4 МПа.

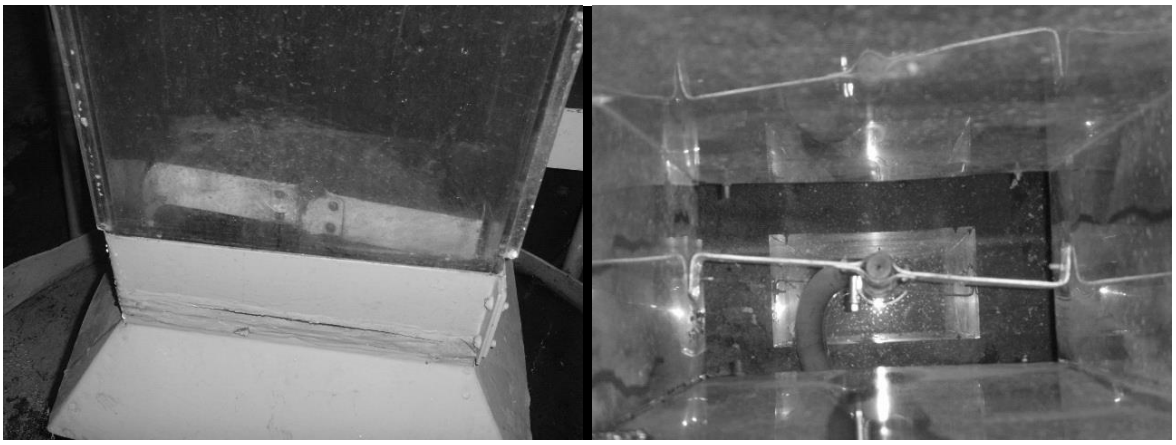


Рис. 4.10.3. Установка форсунки в экспериментальной установке

Водоподводящая система установки служит для подвода воды к форсунке, создающей мелкодисперсный капельный поток. В систему входит кран, трубопровод, фильтр грубой очистки воды, манометр МТП 160 и гибкий подводящий шланг из ПВХ.

Воздухоотводящая система служит для создания направленного восходящего потока в рабочей шахте экспериментальной

установки. Она состоит из центробежного вентилятора и воздуховодов. Для определения скорости воздуха в экспериментальной установке измеряли его объемный расход по перепаду статических напоров с применением измерительной диафрагмы (рис. 4.10.4). Скорость воздушного потока определялась по потере давления на нормальной диафрагме, установленной в отводящем воздуховоде, и наклонному микроманометру ММН-240.

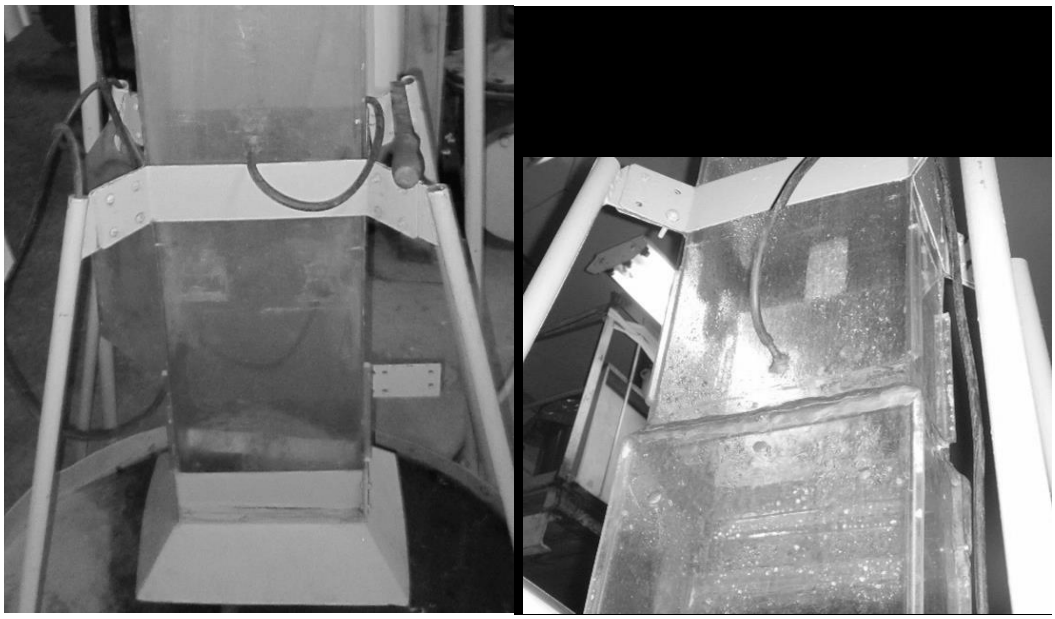


Рис. 4.10.4. Установка измерительной диафрагмы в экспериментальной установке

Водоотводящая система служит для отвода излишков воды, стекающей из нижней части шахты. Она состоит из поддона со штуцером и отводящего резинового шланга.

Температура и относительная влажность входящего в шахту воздуха измеряется термогигрометром Testo 635 в районе расположения установки на высоте не менее 1,5 м от пола. Температура воздуха при проведении серии экспериментов составляла 19–20°С, относительная влажность воздуха 75–86%.

4.11. Методика проведения исследований каплеулавливающих свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C

Эффективность каплеотбойного действия устройства оценивалась по методике ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева весовым способом с помощью каплеулавливающей кассеты путем измерения величины капельного выноса жидкости из установки без каплеуловителя и после его установки. Испытания каплеуловителя проводились в диапазоне скоростей воздушного потока в расчете на полное сечение пустого аппарата 1; 1,5; 2 и 3,2 м/с, высота загруженного слоя насадки менялась в диапазоне высот 200; 300 и 360 мм.

Испытания без каплеуловителя проходили следующим образом. В кассету, установленную в верхней части шахты, загружали каплеулавливающий наполнитель (мелко нарезанные кусочки поролона), предварительно взвешенный на весах. С помощью водоподводящей системы форсункой создавался водяной факел с размером капель от 50 до 200 мкм, давление воды контролировалось по манометру и корректировалось вентилем. Воздух засасывался через конфузорную часть нижней части шахты. Необходимая скорость воздушного потока в шахте устанавливалась и регулировалась дистанционно шиберной заслонкой, управляемой электроприводом. Образованный воздушно-капельный поток, проходя вверх по шахте, попадал в кассету, содержащую водоулавливающий наполнитель, для захвата и фиксации капель. Время ведения испытания, при каждой скорости воздушного потока в опытах составляло 30; 60 и 90 секунд. Затем кассета вынималась из шахты, и производилось повторное взвешивание наполнителя кассеты. Разность в весе наполнителя до и после эксперимента, определяла величину капельного уноса жидкости в установке.

Испытания каплеулавливающих свойств насадки проводили в идентичных условиях, меняя высоту слоя насадки. Слой исследуемой насадки (каплеуловитель) создавал определенное сопротивление восходящему воздушно-капельному потоку. Капли оседали на элементах насадки каплеуловителя, коалесцировали друг с другом, укрупнялись и стекали вниз, а другая часть капель пролетала дальше в верхнюю секцию шахты установки, где и улавливалась с помощью каплеулавливающей кассеты.

После замера величины капельного уноса жидкости производился расчет эффективности каплеулавливающих свойств насадки по зависимости вида:

$$\eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100, \qquad (4.11.1)$$

где η – эффективность каплеулавливающего устройства, %;

q_1 – величина капельного уноса жидкости из установки без каплеулавливающего устройства, кг/с;

q_2 – величина капельного уноса жидкости из установки с каплеулавливающим устройством, кг/с.

4.12. Методика проведения исследований гидравлических свойств новой кольцевой керамической насадки типа N3C

Потерю давления в сухой насадке $\Delta P_{\text{СУХ}}$ (Па) определяли по высоте столба рабочей жидкости (этилового спирта) в микроманометре типа ММН–240 с нормированной погрешностью измерения ±0,2%. Для определения скорости воздуха в экспериментальной установке измеряли его объемный расход по перепаду статических напоров с применением измерительной диафрагмы. В результате исследований определено гидравлическое сопротивление неорошаемой (сухой) насадки.

4.13. Разработка и исследование нового способа укладки керамической кольцевой насадки. Экспериментальные установки и методика проведения испытаний

Напомним, что к насадкам, применяемым для заполнения насадочных колонн, предъявляют следующие требования: они должны иметь большую удельную поверхность и большой свободный объем, хорошо смачиваться, не забиваться, обладать высокой механической прочностью. Кроме того, насадка должна оказывать малое сопротивление газовому потоку, равномерно распределять

жидкость и обладать коррозионной стойкостью в соответствующих средах. Для уменьшения давления на поддерживающее устройство и стенки, слой насадки должен обладать большой порозностью.

В настоящее время в промышленности применяются как регулярные (правильно уложенные) так и нерегулярные (засыпаемые внавал) насадки. При нерегулярной загрузке кольцевой керамической насадки ориентация у большинства элементов насадки вблизи стенок соосна стенкам колонного аппарата, что способствует образованию сквозных байпасных каналов в пристенной области аппарата. Указанное явление приводит к нарушению равномерности газораспределения в колонных аппаратах, и, как следствие, способствует перераспределению жидкости к стенкам колонного аппарата, что нежелательно для осуществления процессов тепло- и массообмена. Регулярные насадки, за счет упорядоченной структуры, препятствуют возникновению застойных зон во внутренней части насадки, характерных при применении насыпных насадок. Кроме того, регулярные насадки способны работать с высокими нагрузками по газовой фазе и отличаются более низким гидравлическим сопротивлением, менее материалоемки и обладают более высокой удельной поверхностью. Колонны с регулярными насадками относятся к наиболее эффективным массообменным аппаратам.

Слой регулярной насадки может быть образован, например, кольцами Рашига. При этом кольца укладываются в колонном аппарате правильными рядами.

Для регулярной укладки используют и специальные насадки. Одним из путей интенсификации процесса тепло- и массообмена является создание новых видов высокоэффективных и технологичных в изготовлении насадок для массообменных колонных аппаратов. К таким насадкам можно отнести структурные кольцевые насадки, обладающие высоким значением удельной поверхности. В ряде случаев их изготовляют из нескольких составных частей, которые соединяют в разъемные и неразъемные конструкции. Структурные насадки [6] позволяют упростить процесс регулярной укладки за счет специальных приспособлений (игольчатые выступы, зубчики, замки).

Проведенные опыты по изучению течения жидкости по поверхности кольцевых насадок (рис. 4.13.1) показали, что при обычной регулярной укладке в местах контакта соседних элементов друг с другом образуются мениски жидкости, которые омертвляют значительную часть поверхности насадки (~ 30%) за счет образования застойных зон. Тем самым зона контакта соседних элементов друг с другом исключается из активного участия в процессе тепло- и массообмена.



Рис 4.13.1. Течение жидкости в месте контакта двух соседних элементов кольцевой насадки

На основании проделанного анализа был предложен новый способ регулярной укладки (получено положительное решение по выдаче патента на изобретение по заявке № 2010108213).

Предлагаемый способ регулярной укладки керамических кольцевых насадок (рис. 4.13.2 и 4.13.3) заключается в дистанцировании соседних элементов насадки на определенное расстояние друг от друга. Это расстояние – S, выбирается из соотношения:

$$S = 2\delta + B, \qquad (4.13.1)$$

где B = 3÷4 мм – минимальное расстояние между пленками на соседних элементах насадки; δ – толщина пленки жидкости, мм.

Указанное расстояние позволяет исключить образование застойных зон в колонных аппаратах с регулярной насадкой.

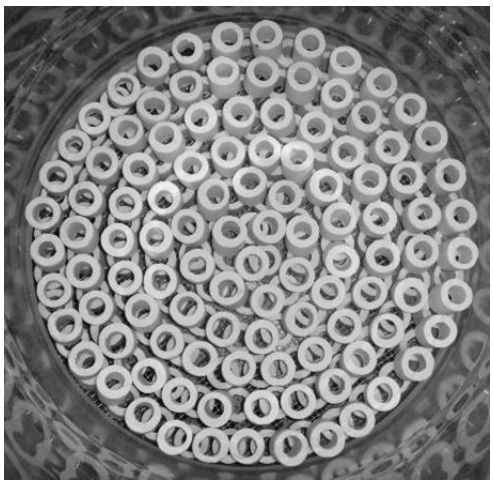
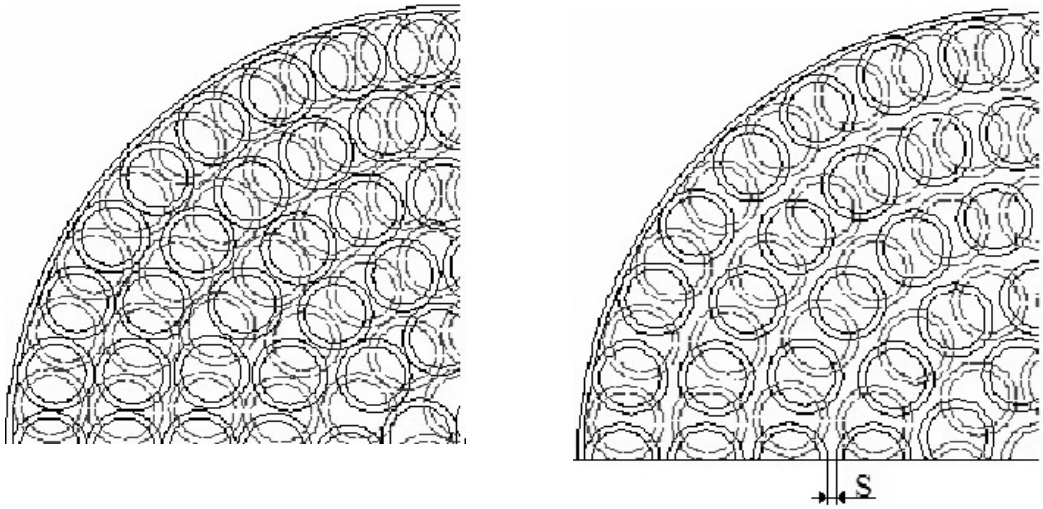


Рис. 4.13.2. Новый способ регулярной укладки



а) существующий способ укладки, без зазора между элементами насадки

б) предлагаемый способ укладки

Рис. 4.13.3. Виды регулярной укладки

Толщину пленки жидкости – δ, можно определить по следующим критериальным уравнениям [7]:

− для ламинарного течения пленки жидкости, при $Re_ж < 1600$:

$$\delta = 0{,}908 \cdot \left(\frac{\nu_ж^{\,2}}{g} \right)^{1/3} \cdot Re_ж^{1/3}, \qquad (4.13.2)$$

где $\nu_ж$ – кинематическая вязкость жидкости, м^2/с;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

$Re_ж$ – число Рейнольдса для пленки жидкости.

– для турбулентного течения пленки жидкости, при $1600 \le \mathrm{Re}_{ж} \ge 30000$:

$$\delta = 0{,}135 \cdot \left(\frac{\nu_{ж}^{\,2}}{g} \right)^{1/3} \cdot \mathrm{Re}_{ж}^{0{,}583}, \qquad (4.13.3)$$

В свою очередь число Рейнольдса для пленки жидкости рассчитывается по формуле [7]:

$$\mathrm{Re}_{ж} = \frac{4q_{ж}}{\nu_{ж}}, \qquad (4.13.4)$$

где $q_{ж}$ – плотность орошения, м^3/(м·с).

Проведенные расчеты показали, что толщина пленки при ламинарном течении пленки жидкости ($\mathrm{Re}_{ж} < 1600$) составляет: δ = 0,1–0,5 мм. При турбулентном течении пленки жидкости ($1600 \le \mathrm{Re}_{ж} \ge 30000$) составляет: δ = 0,5–1,5 мм.

Таким образом, предложенная новая регулярная укладка кольцевых насадок с дистанцированием соседних элементов обеспечивает существенное увеличение поверхности контакта фаз до 30% за счет исключения образования застойных зон.

Для определения гидравлических характеристик нового способа укладки проводились исследования укладки в экспериментальной установке, описанной выше.

Поэтапный способ укладки кольцевой насадки показан на рис. 4.13.4.

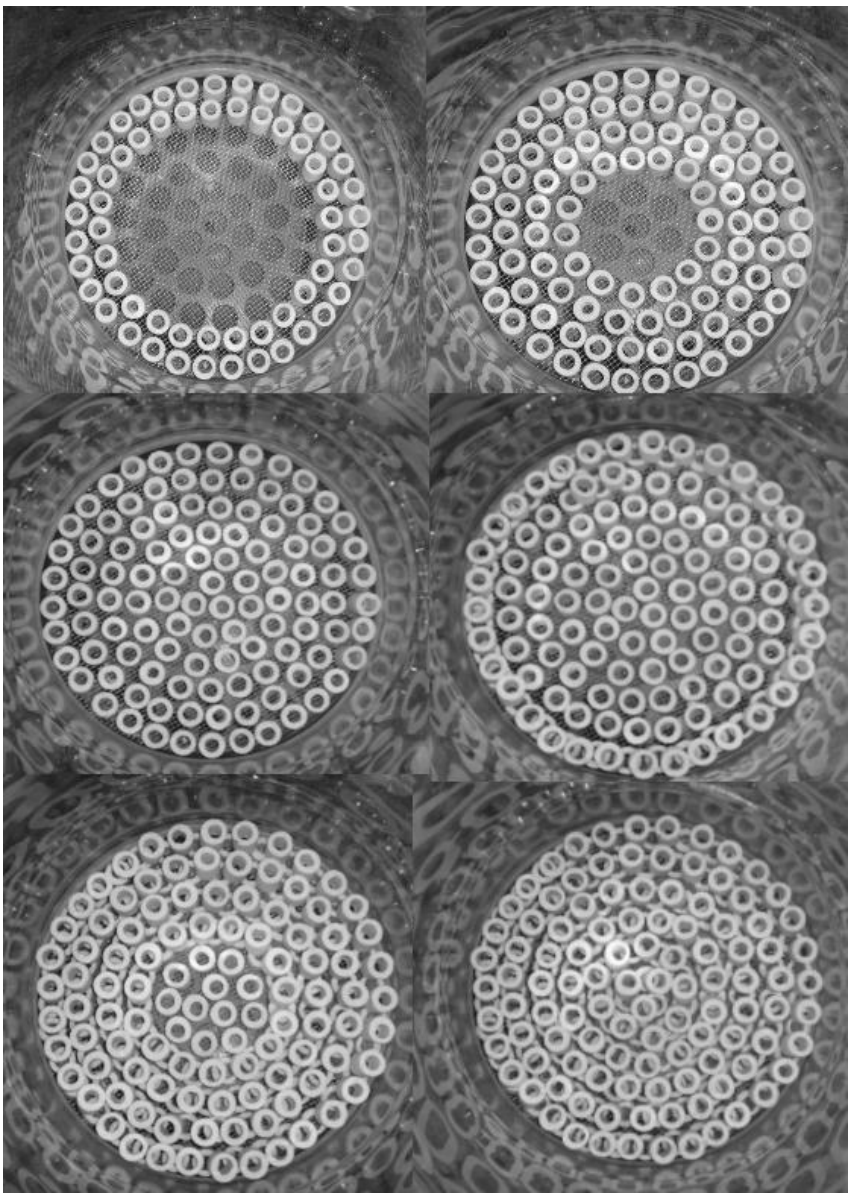


Рис. 4.13.4. Поэтапный способ укладки кольцевой насадки

4.14. Экспериментальная установка для исследования гидравлических характеристик нового способа укладки керамической кольцевой насадки

Установка представляет собой вертикальную цилиндрическую колонну с прозрачными стенками. В нижней части колонны расположены сетчатая тарелка и опорная решетка, которые служат опорой для насадки и имеют большое живое сечение для прохода газа и жидкости. В верхней части колонны расположено оросительное устройство, которое обеспечивает равномерное распределение

жидкости по сечению аппарата и поверхности насадки. Газ подается в колонну снизу под решетку от автономного вентилятора высокого давления и движется вверх. Таким образом, контакт газа и жидкости происходит в противотоке. Расход воздуха регулируется изменением числа оборотов двигателя, управляемого с помощью преобразователя частоты VFD-V. Для измерения расхода воздуха в установке предусмотрен счётчик газа RVG–100 (со встроенным импульсным датчиком чувствительностью 14025 имп./м^3) и вторичный счётчик, в качестве которого используется счётчик импульсов ОВЕН СИ8. Для определения расхода воды на орошение колонны используется ультразвуковой счётчик (с импульсным датчиком чувствительностью 300 имп/литр) и счётчик ОВЕН СИ8. Замер относительной влажности и температуры воздуха осуществляется при помощи двух преобразователей КИП–20 и двух вторичных приборов, в качестве которых применены два двухканальных измерителя ОВЕН ТРМ200.

Перепад давления на насадке замеряется датчиком типа Зонд 10–ИД–1021, имеющим токовый выход 4 – 20 мА, и вторичным измерителем, в качестве которого служит измеритель регулятор ОВЕН ТРМ201.

Для связи приборов установки с ПК используется адаптер интерфейса RS 232/RS 485 ОВЕН АС3. Результаты измерений передаются в компьютер, протоколируются и отображаются на мониторе.

Принципиальная схема установки показана на рис. 4.14.1. Общий вид установки показан на рис. 4.14.2.

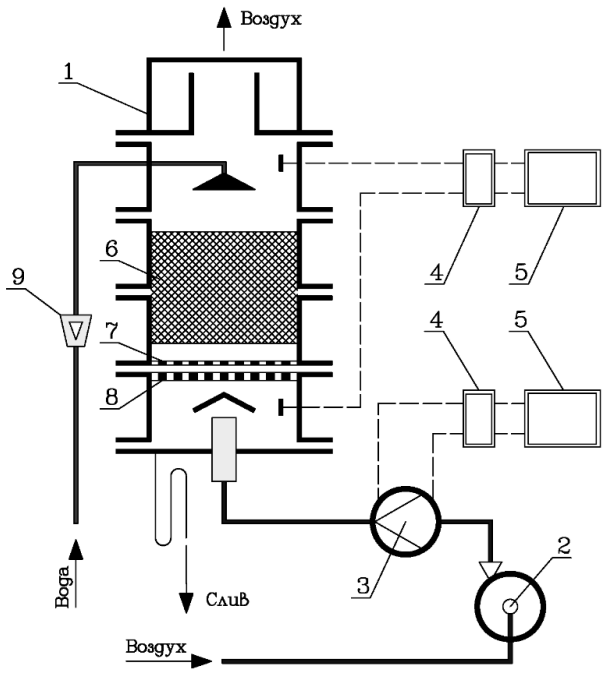


Рис. 4.14.1. Принципиальная схема установки:
1 – колонна; 2 – вентилятор; 3 – измеритель расхода воздуха диафрагменного типа); 4 – дифференциальный манометр; 5 – двухканальный измеритель; 6 – насадка; 7 – ситчатая тарелка; 8 – опорная решетка; 9 – ротаметр

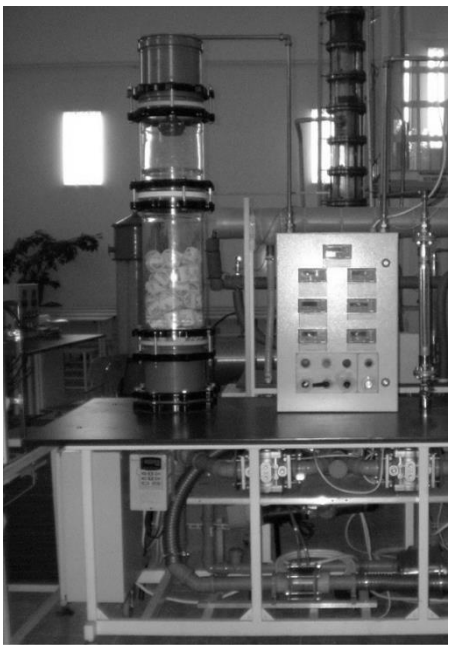


Рис. 4.14.2. Общий вид экспериментальной установки

4.15. Исследование гидравлических свойств новых насадок

Исследования гидравлических свойств новой насадки проводились в сухой и орошаемой колонне.

Исследовались два способа укладки, известный и предложенный, при одинаковых условиях.

Насадка загружалась в колонну. В нижнюю часть колонны вентилятором 2 через измеритель расхода газа 3 в колонну с насадкой 1 подавался воздух. Дифференциальными манометрами 4 замерялись соответственно перепад давления в колонне ΔP и на диафрагме ΔP_D. В двухканальных измерителях 5 сигнал от манометров 4 преобразовывался и выдавался в цифровом виде.

Исследования проводились при расходах воздуха в диапазоне от 8,5 м^3/ч до 98,9 м^3/ч. Скорость воздушного потока в расчете на полное сечение пустого аппарата изменялась в интервале от 0,075 м/с до 0,9 м/с.

Аналогичным методом производили испытания орошаемой насадки, расход жидкости 360 кг/ч.

Результаты исследований эффективности каплеулавливающих свойств новой керамической кольцевой насадки типа N3C представлены в таблице 4.15.1 и на рис. 4.15.1, 4.15.2.

Таблица 4.15.1

Эффективность каплеулавливающих свойств новой керамической насадки типа N3C

H, м / ω_K, м/с	0,2	0,3	0,33	0,36
1	97,45	98,19	98,19	98,3
1,5	98,75	99,43	99,43	99,51
2,0	97,84	99,61	99,61	99,7
3,2	97,23	99,61	99,61	99,7

Зависимость эффективности каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки типа N3C от скорости воздуха в свободном сечении аппарата ω_K (м/с) для различной высоты слоя насадки представлена на рис. 4.15.1.

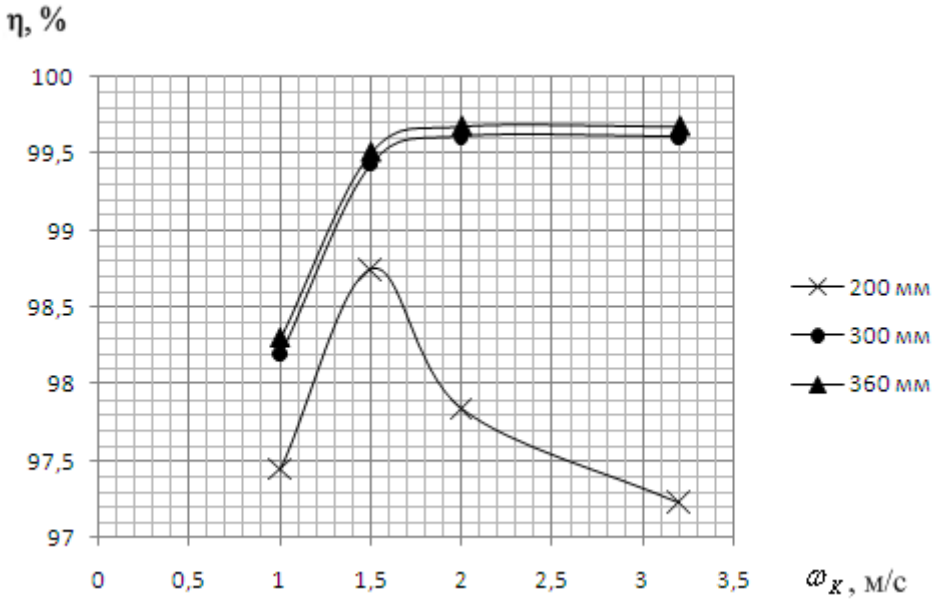


Рис. 4.15.1. Зависимость эффективности каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки от скорости воздуха в свободном сечении аппарата

Из графика, представленного на рис. 4.15.1, видно, что эффективность каплеулавливающего действия η (%) зависит от скорости воздуха в свободном сечении аппарата $\omega_К$ (м/с).

При высоте 0,2 м зависимость эффективности каплеулавливающего действия от скорости воздушного потока носит экстремальный характер. В диапазоне скоростей от 1 до 1,5 м/с эффективность возрастает и при $\omega_К$ = 1,5 м/с достигает максимального значения η = 98,75 %, затем снижается до значения η = 97,25 % при $\omega_К$ = 3,2 м/с.

Это явление можно объяснить «повторным уносом» капель жидкости. При скоростях воздушного потока $\omega_К$>2 м/с возможно частичное разрушение пленки жидкости и «повторный унос» капель жидкости с восходящим потоком воздуха. Высоты насадки не хватает для эффективного «захвата» мелких повторных капель-брызг и предотвращения их «уноса».

При высоте слоя насадки 0,3 и 0,36 м в диапазоне скоростей воздушного потока от 1,0 до 2,0 м/с эффективность каплеулавливания возрастает с увеличением скорости. В диапазоне скоростей от 2 до 3,2 м/с, эффективность каплеулавливающего действия носит линейный характер и не зависит от скорости воздуха в свободном сечении аппарата.

Наибольшая эффективность каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки η = 99,7 % достигается при высоте слоя насадки 0,36 м, при скорости газового потока от 2 до 3,2 м/с.

Зависимость эффективности каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки типа N3C от высоты слоя насадки представлена на рис. 4.15.2.

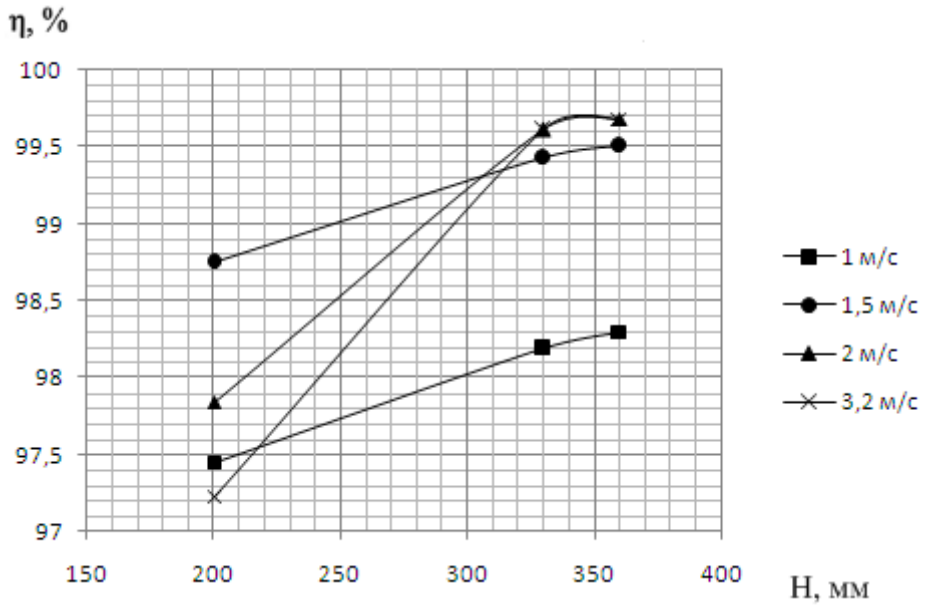


Рис. 4.15.2. Зависимость эффективности каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки от высоты слоя насадки

Из графика, представленного на рис. 4.15.2, видно, что эффективность каплеулавливающего действия η (%) зависит от высоты слоя насадки *H* (мм).

Наибольшая эффективность каплеулавливающих свойств насадки η = 99,73 достигается при высоте слоя 300–360 мм, при скоростях воздушного потока ω_K = 2÷3,2 м/с и дальше идет на спад.

Сравнение каплеулавливающих свойств новой керамической кольцевой насадки тира N3C с широко применяемыми в промышленности каплеуловителями, приведено на рис. 4.15.3.

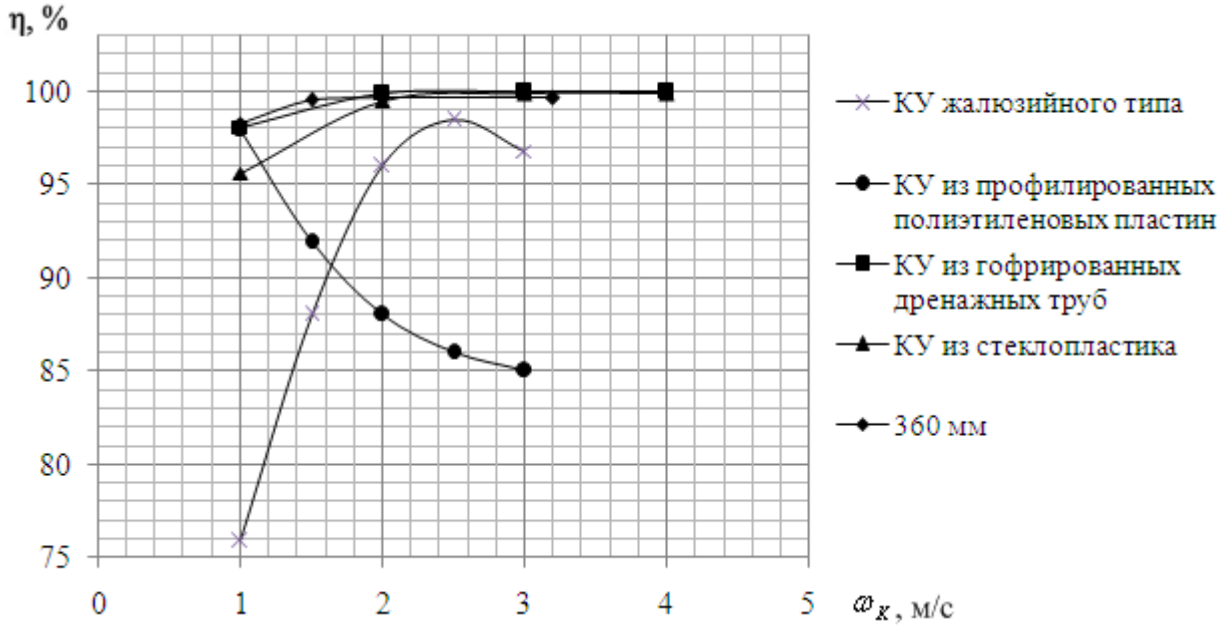


Рис. 4.15.3. Сравнение эффективности каплеулавливающего действия новой кольцевой керамической насадки и известных каплеуловителей

Как видно из рис. 4.15.3, эффективность улавливания капель жидкости исследуемой насадки близка к эффективности каплеулавливающих устройств из гофрированных дренажных труб и из стеклопластика. В отличие от каплеуловителя из профилированных полиэтиленовых пластин у новой насадки с ростом скорости прослеживается рост эффективности каплеулавливающих свойств. В диапазоне скоростей $2 \leq \omega_К \leq 3$ м/с новая керамическая кольцевая насадка обладает эффективностью на 2% больше, чем каплеулавливающее устройство жалюзийного типа. В диапазоне скоростей $2 \leq \omega_К \leq 3$ м/с у каплеулавливающих устройств жалюзийного типа и у каплеулавливающих устройств из профилированных полиэтиленовых пластин наблюдается активный спад эффективности в отличие от новой керамической насадки. Это явление можно объяснить тем, что каплеулавливающее устройство, выполненное из слоя новой керамической кольцевой насадки, обладает более сложной геометрической поверхностью, что увеличивает вероятность «захвата» капель, уносимых выходящим из аппарата потоком воздуха.

Как видно из проведенного сравнения, новая керамическая насадка обладает каплеулавливающими свойствами, схожими с широко применяемыми в промышленности каплеулавливающими

устройствами, а в диапазоне скоростей $2 \leq \omega_К \leq 3$ м/с обладает большей эффективностью по сравнению с каплеулавливающим устройством жалюзийного типа и каплеулавливающим устройств из профилированных полиэтиленовых пластин.

Представляет также интерес сопоставление результатов опытов по насадке N3C с данными по неупорядоченной насадке «Инжехим-2000» и кольцам Рашига. Это сравнение представлено в табл. 4.15.2.

Таблица 4.15.2

Эффективность каплеулавливающего действия различных насадок

Тип насадки	Высота слоя насадки, м	Удельная поверхность, $м^2/м^3$	Порозность, $м^3/м^3$	Эффективность каплеулавливания, %
Неупорядоченная насадка «Инжехим-2000» 60 мм	0,35	110	0,945	85,6
Неупорядоченные кольца Рашига 50х50х5 мм	0,35	90	0,785	98,9
Неупорядоченная насадка N3C 50х50х5 мм	0,2	97	0,88	97,3
	0,3			99,6
	0,36			99,7

Как видно из данных, представленных в табл. 4.15.2, разработанная новая керамическая кольцевая насадка типа N3C, обладает большей эффективностью, чем «Инжехим-2000» и кольца Рашига, при той же высоте слоя насадки, что можно объяснить особенностями ее формы, которая обеспечивает большую извилистость при течении потока в объеме элементов насадки типа N3C.

Учитывая изложенное, новая кольцевая керамическая насадка типа N3C может быть рекомендована к широкому использованию в колонных аппаратах, в частности в градирнях.

В результате проведенных гидродинамических исследований сухой новой керамической насадки типа N3C были получены экспериментальные данные по ее гидравлическому сопротивлению в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении аппарата.

Полученные экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению сухой новой керамической насадки типа N3C представлены в таблице 4.15.3.

Таблица 4.15.3

Гидравлическое сопротивление новой керамической насадки типа N3C без подачи орошения

Тип насадки	ω_K, м/с	$\Delta p_{сух}$, Па	$\frac{\Delta p_{сух}}{H}$, Па/м
N3C	1,03	23,544	78,48
	1,52	51,404	171,348
	2,02	88,29	294,3
	3,0	188,744	629,148
	4,0	328,635	1095,1

Зависимость гидравлического сопротивления сухой новой керамической насадки типа N3C от скорости воздуха в свободном сечении аппарата $\Delta P_{сух} / H = f(\omega_K)$ в расчете на слой насадки высотой $H = 1$ м представлена на рис. 4.15.4.

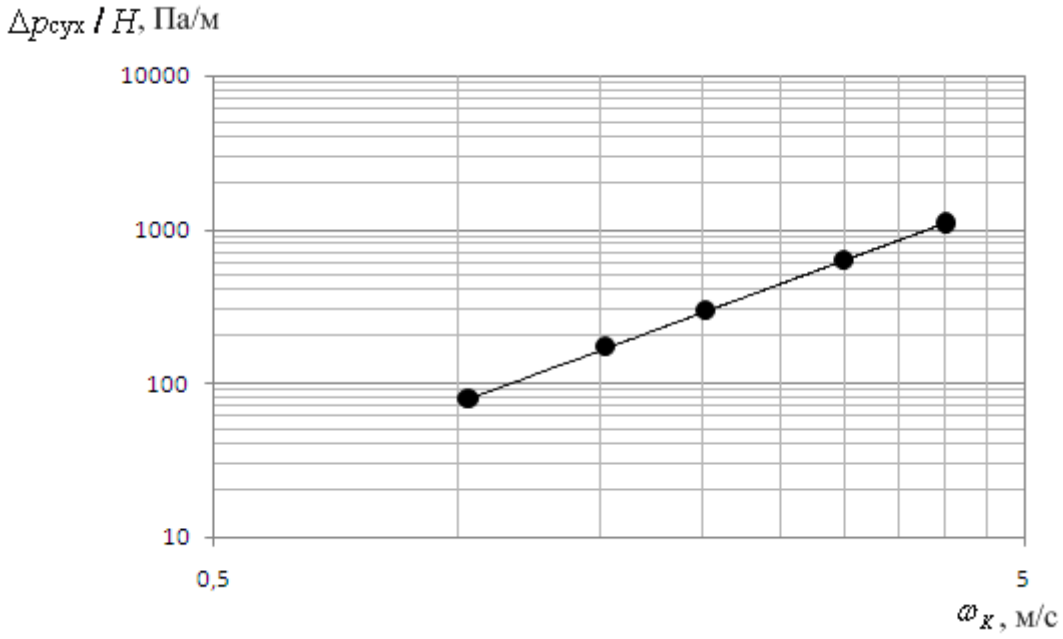


Рис. 4.15.4. Зависимость гидравлического сопротивления новой кольцевой керамической насадки от скорости воздуха в свободном сечении аппарата

При расчёте гидравлического сопротивления (в частности гидравлического сопротивления насадки), используют как коэффициент гидравлического сопротивления ξ (отношение потерь давления к динамическому напору), так и критерий Эйлера (Eu-отношение потерь давления к удвоенному динамическому напору), так как ξ = 2Eu. Результаты расчетов критериев Эйлера и Рейнольдса представлены в таблице 4.15.4.

Таблица 4.15.4

Расчетные значения критерия Eu и критерия Re для сухой новой керамической насадки типа N3C

Eu	47,003	44,418	43,197	41,868	40,397
Re	2592	3940	5237	7777	10450

Зависимость критерия Эйлера сухой новой керамической насадки типа N3C от числа Рейнольдса Re представлена на рис. 4.15.5.

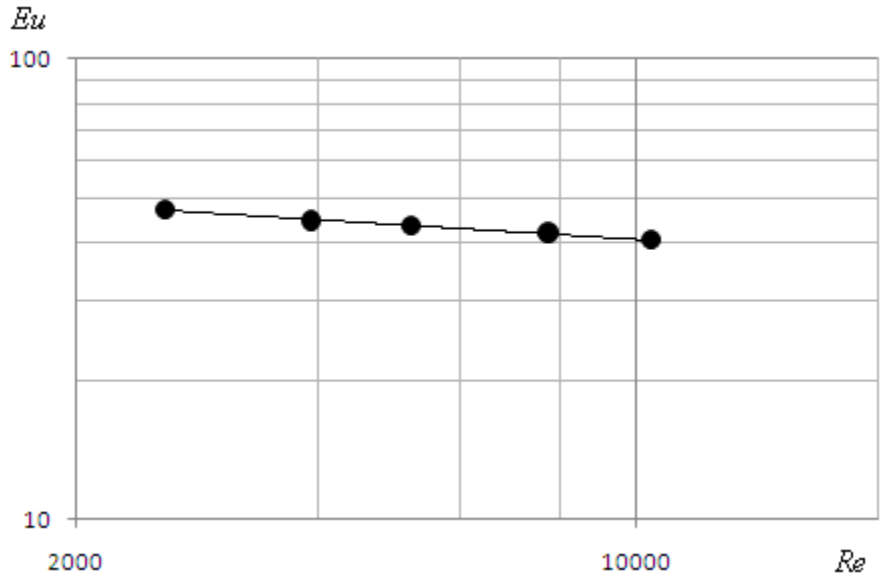


Рис. 4.15.5. Зависимость числа Эйлера новой кольцевой керамической насадки от числа Рейнольдса

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов была получена расчетная эмпирическая зависимость для определения критерия Эйлера по заданным значениям критерия Рейнольдса:

$$\mathrm{Eu} = \frac{106{,}2}{\mathrm{Re}^{0{,}1}}, \qquad (4.15.1)$$

С учетом эмпирической зависимости (4.15.1) уравнение для определения гидравлического сопротивления одного погонного метра сухой насадки (2.1) примет вид:

$$\frac{\Delta P_{\text{сух}}}{H} = \frac{106{,}2}{\mathrm{Re}^{0{,}1}} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{\Gamma}}{\varepsilon^2}, \qquad (4.15.2)$$

Область применения формул (4.15.1) и (4.15.2) соответствует диапазону значений критерия Рейнольдса по газу $2590 \le \mathrm{Re} < 10450$. По данной эмпирической зависимости можно рассчитать значение гидравлического сопротивления сухой новой керамической насадки типа N3C с точностью 99%.

Таким образом, полученная зависимость $\mathrm{Eu} = f(\mathrm{Re})$ позволяет с достаточной точностью проводить оценочные расчеты гидравлического сопротивления новой кольцевой керамической насадки типа N3C.

Сравнение основных геометрических характеристик новой кольцевой керамической насадки типа N3C с аналогичными характеристиками наиболее близких по конструктивным особенностям насадок, широко применяемых в промышленности, приведено в табл. 4.15.5.

Таблица 4.15.5

Основные геометрические характеристики насадок

№ п/п	Тип насадки	Размеры насадки, мм	Удельная поверхность, $м^2/м^3$	Свободный объем, $м^3/м^3$	Число элементов в $1м^3$, штук внавал	Удельная материалоемкость, $кг/м^3$
1	N3C	50x50x5	97	0,88	4350	380,4
2	Кольца Рашига	50x50x5	90	0,785	6000	530
3	Кольца Палля	50x50x5	120	0,78	5800	520
4	Кольцо с крестообразной перегородкой	50x50x5	137,78	0,645	6000	820

Зависимость гидравлического сопротивления неорошаемых (сухих) насадок, приведенных в табл. 4.15.5, от скорости воздуха в свободном сечении аппарата представлена на рис. 4.15.6.

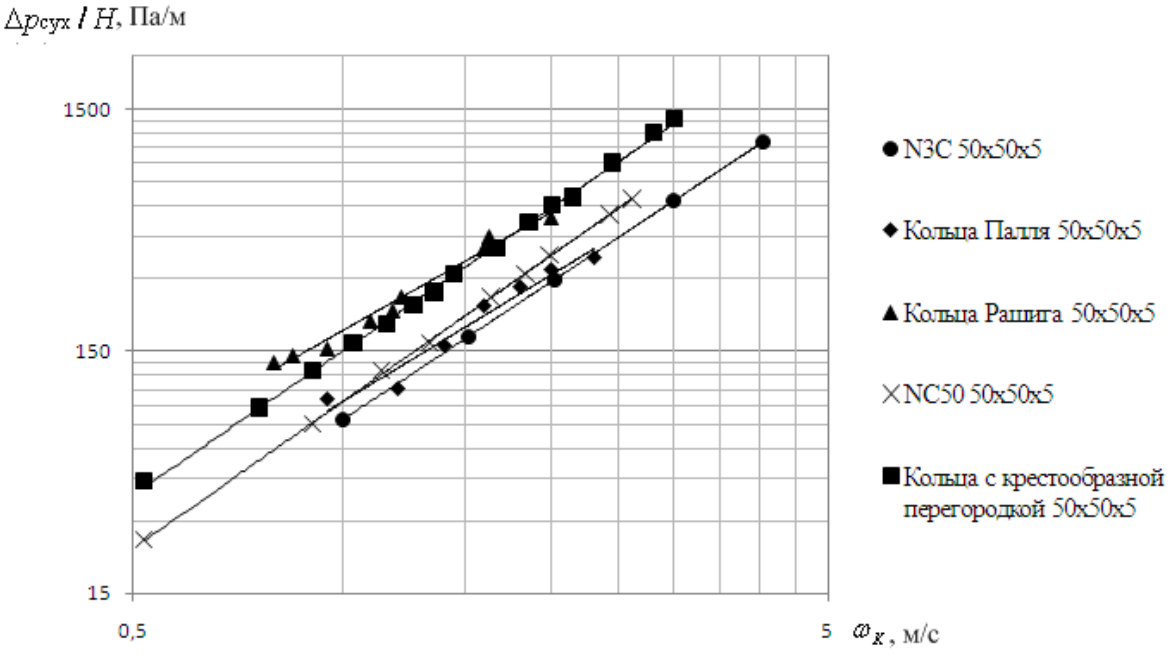


Рис. 4.15.6. График зависимости гидравлического сопротивления неорошаемых (сухих) насадок от скорости воздуха в свободном сечении аппарата

Как видно из графика на рис. 4.15.6, гидравлическое сопротивление новой кольцевой керамической насадки типа N3C близко к сопротивлению колец Палля и значительно меньше гидравлического сопротивления колец Рашига. При этом новая кольцевая керамическая насадка типа N3C обладает по сравнению с кольцами Рашига большей удельной площадью поверхности (на 10%) и большей долей свободного объема (на 10%), что объясняется более развитой удельной поверхностью насадки.

Как видно из проведенного сравнения, новая кольцевая керамическая насадка типа N3C (патент на полезную модель №95555 зарегистрированный в Государственном реестре полезных моделей РФ 10.07.2010) характеризуются более низким гидравлическим сопротивлением по сравнению с широко применяемыми в настоящее время насадками, а также, что немаловажно, проста при изготовлении.

Контрольные вопросы

1. Область применения каплеулавливающих устройств.
2. Механизмы осаждения капель на поверхности слоя каплеулавливающего устройства.
3. Классификация каплеулавливающих устройств.
4. Устройство, принцип действия каплеулавливающих устройств жалюзийного типа.
5. Устройство, принцип действия трубчатых каплеуловителей.
6. Устройство, принцип действия сеточных каплеуловителей.
7. Принцип действия каплеуловителей выполненных из геликоидных элементов.
8. Устройство, принцип действия каплеуловителей решетчатого типа.
9. Конструкции насадочных элементов каплеулавливающих устройств.
10. Требования, предъявляемые к насадочным элементам каплеулавливающих устройств.
11. Как определяется эффективность каплеулавливающих устройств.
12. Устройство принцип действия экспериментальной установки для исследования каплеулавливающих свойств насадки.
13. Как определяется толщина плёнки жидкости при ламинарном течении?
14. Как определяется толщина плёнки жидкости при турбулентном течении?
15. По какой зависимости рассчитывается критерий Рейнольдса для плёнки жидкости?
16. Почему в эмпирических зависимостях при расчёте гидравлического сопротивления (потерь давления) используется, как коэффициент гидравлического сопротивления, так и критерий Эйлера?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных промышленных установках теплоэнергетики, химической, металлургической и смежных отраслях промышленности в течение многих десятилетий широко используются градирни – аппараты испарительного охлаждения. Основным элементом градирен является так называемый ороситель – контактное насадочное устройство, от которого зависит эффективность процесса и энергетические затраты, связанные с продувом воздуха через насадку. Работа градирен связана со значительным каплеуносом, который может быть снижен без существенных энергетических затрат при правильном выборе и расчёте новых перспективных каплеулавливающих устройств.

Предлагаемое учебное пособие содержит необходимые материалы для получения студентами основных знаний по расчету и конструированию градирен. Материалы книги могут быть использованы при подготовке бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов, обучающихся по различным направлениям и специальностям, связанным с курсом ПАХТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Глава 1

1. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84), Нормативно-производственное издание, ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, 194 с.
2. Каталог модульных вентиляторных градирен типа «Вихрь»,2015, [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.gradirni.com.ua (дата доступа 20.04.2017).
3. Каталог малогабаритных градирен типа «Росинка», [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.tecopro.ru.
4. Каталог градирен типа «ГРАД» фирмы «Балтэнергомаш. [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.bem.sp.ru/kat.htm.
5. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
6. Калатузов В.А. Расчетные зависимости оросителей градирен // Энергосбережение и водоподготовка, 2011. – №1(69). – С.62–66.
7. Методика проведения натурных гидротермических и аэродинамических испытаний градирен испарительного типа СО 34.22.303-2005. – 49 с.
8. Пушнов А.С., Городилов А.А., Беренгартен М.Г. Конструктивные характеристики регулярных насадок и их влияние на эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях. / А.С. Пушнов, А.А. Городилов, М.Г. Беренгартен //Энциклопедия инженера-химика. -№12, 2013. – с.29–42.
9. Ведьгаева И.А. Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой: автореф. дисс. на соискание степени канд.тех.наук: 05.14.04 / Ведьгаева Ирина Александровна.-Казань., 2001.
10. Дмитриева Г.Б. Гидродинамика и массобмен в структурированных насадках из гофрированных листов: автореф. дисс. на

соискание степени канд.тех.наук.: 05.17.08/ Дмитриева Галина Борисовна. – Иваново.,2007.
11. Рябушенко А.С., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Модернизация градирен в системах оборотного водоснабжения / А.С. Рябушенко, А.С. Пушнов, М.Г. Беренгартен // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности. I Международная конференция Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. Сб. тезисов докладов, с.162.
12. Макушева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. Контактные устройства для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий/ О.С. Макушева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №3. с. 153–154.
13. Гильфанов К. Х., Давлетшин Ф. М., Гилязов Д. Р. Повышение эффективности охлаждения воды и исследование градирен как объекта управления. Казань.: КГЭУ, 2010 . – 183 с.
14. Ильясов С.Г. Процессы и аппараты упаковочного производства: Конспект лекций. М.: МГУП, 2004. – 260 с.
15. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев; под общ. ред. В.С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.

Глава 2

1. Korovin, P.I., Lagutkin, M.G., Baranova, E.Y Study of the Hydraulic Resistance and Heat and Mass Transfer Characteristics of Prismatic Packing for Various Options of Its Installation. // Chemical and Petroleum Engineeringthis link is disabled, 2021, 57(1–2), pp. 44–49
2. Пат. №2044993 РФ, F28F 25/00. Насадка для тепломассообменного аппарата / Витенко В.А., Ипатов В.Н., Кузин А.Н., Пономаренко В.С., Сухов В.М.
3. Пат. №2182302 РФ, F28F25/08, F28C1/00. Блок насадки градирни / Буланов П.Ф., Ипатов В.Н., Пономаренко В.С., Сухов В.М.
4. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат: 1988, 372 с.

5. Коровина Н.А, Баранова Е.Ю., Болотников А.М., Митин А.К., Пушнов А.С. Исследование гидравлического сопротивления конструкций укладки решетчатых призм с внутренними вставками для биологической очистки отходящих газов. Advances in Science and Technology. Сборник статей VII международной научно-практической конференции. М.: «Актуальность.РФ», 2017, с. 62–65.
6. Бабиев В.А., Коровин П.М., Лагуткин М.Г., Генералов М.Б., Сидельников И.И. Исследование гидравлического сопротивления регулярной насадки новой конструкции // Химическая промышленность сегодня. 2018.№5. С. 26–29.
7. Пат. №2586037 РФ, F28F25/08. Регулярная насадка для осуществления процессов тепло- и массообмена / Баранова Е.Ю., Пушнов А.С., Коровин П.И., Платонова Н.А., Бабиев В.А.
8. Цурикова Н.П., Пушнов А.С., Лагуткин М.Г., Шишов В.И. Влияние высоты ярусов в блоке регулярной насадки на эффективность процесса испарительного охлаждения оборотной воды // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. №1. С. 4–7.
9. Гельфанд Р.Е. Уравнения тепломассообмена и соотношение между коэффициентами отдачи в теории и практике технологических расчетов градирен // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Гидравлика гидротехнических сооружений, 2006. – Т.245. – С.196–203.

Глава 3

1. Лагуткин М.Г., Цурикова Н.П., Пушнов А.С. Оптимизация конструкции короткослоевой насадки градирен // Энергосбережение и водоподготовка. -2017. – №1 (105). С. 23–26.
2. Пушнов А.С., Цурикова Н.П., Лагуткин М.Г. О влиянии высоты ярусов регулярной насадки на эффективность процессов тепло- и массоотдачи // Энергосбережение и Водоподготовка. – 2012. – №1(75). – С. 42–46.
3. Проспект фирмы Chladici Veze Praha a.s. 2006. – 27 P.
4. Технический отчет по договору № ВН-1256/НТУ «Лабораторные сертификационные гидроаэротермические испытания об-

разцов оросительных устройств градирен» ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева», 2005. – 50с.
5. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
6. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2007. – 500 с.
7. Махнин А.А. Совершенствование процессов и аппаратов для очистки паровоздушных смесей от органических растворителей сорбционными методами. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени д.т.н., Ярославль: ЯрГТУ, 2010. – 34 с.

Глава 4

1. Витковская Р.Ф. Разработка и исследование полимерных волокнистых катализаторов и контактных элементов для ресурсосбережения и охраны окружающей среды: Дисс. на соискание ученой степени док. техн. наук. С – П., 2005. – 366 с.
2. Каган А.М., Пушнов А.С., Рябушенко А.С. Насадочные контактные устройства // Химическая технология. – 2007. № 5. – С. 232–240.
3. Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Каган А.М., Пушнов А.С., Климов А.Г. Сравнение тарельчатых и насадочных контактных устройств колонных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. №1. – С. 9–10.
4. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость. – М.: Высшая школа, 1962. – 656 с.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Госхимиздат, 1960. – 832 с.
6. Коморович Т., Магера Я., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г. Высокоэффективные кольцево-структурные насадки // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2001. – № 8. – с. 8–12.
7. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.

Учебное электронное издание

Беренгартен Михаил Георгиевич, **Лагуткин** Михаил Георгиевич

КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГРАДИРЕН

Учебное пособие

Разработано с помощью программного обеспечения
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro

Издается в авторской редакции

Ответственный за выпуск *А.В. Куркова*
Компьютерная верстка: *Н.Р. Гуськова*

Подписано к использованию 06.07.2023
Объем издания 4,82 Мб. Тираж 50. Заказ № 36

Издательство Московского Политеха
115280, Москва, Автозаводская, 16
www.mospolytech.ru; e-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru;
тел. (495) 276-33-67