

06.074.511
Ж 13



Проф. Н. М. ЖАВОРОНКОВ

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СКРУББЕРНОГО ПРОЦЕССА
И
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В СКРУББЕРАХ**

НЕ СЧИТАЕТСЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
«СОВЕТСКАЯ НАУКА»
МОСКВА — 1944

Н. М. ЖАВОРОНКОВ
профессор Московского Ордена Ленина
химико-технологического института
имени Д. И. Менделеева

Ж 13
627.086.2
24-13.

Прогноз 1950

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СКРУББЕРНОГО ПРОЦЕССА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В СКРУББЕРАХ

40983

ГОСУДАРСТВЕННАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

пр 96

40983 пр 89, 08

Деп.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

Государственное издательство
СОВЕТСКАЯ НАУКА
Москва—1944

Книга представляет собой первую попытку обобщения экспериментальных данных по гидродинамике скрубберного процесса и теплопередаче в скрубберах, а также установления основных закономерностей, связанных с движением газового потока и теплопередачей в скрубберах с насадкой.

Наряду с этим в книге даны краткие сведения о методе моделирования и теории подобия, которые были положены автором в основу исследования и обработки экспериментальных данных.

Книга предназначена в качестве пособия для инженеров при проектировании скрубберов, башен, химической аппаратуры скрубберного типа и установления правильного технологического режима и интенсификации заводских установок. Она может также служить учебным пособием для студентов вузов при изучении соответствующих разделов курса химической аппаратуры и при дипломном и курсовом проектировании.

Редактор *Н. Г. Левинсон*

Подписано в печать 27/IX 1944 г. ЕО15584. Тираж 2000. Печ. л. 14. Афт. л. 16,5.
55000 в 1 п. л. Цена 20 руб.

Тип. им. Маяк Орган РСФСР треста «Полиграфиздат», г. Куйбышев, ул. Вонца, 60.
Заказ № 1907.

ОТ АВТОРА

Скрубберы и башни с насадкой являются широко распространенным видом химической аппаратуры, применяемым во многих отраслях промышленности.

В химической промышленности, в ряде производств скрубберы и башни с насадкой являются основным технологическим оборудованием.

Однако, несмотря на широкое применение скрубберов и многолетнюю практику их промышленной эксплуатации, скрубберный процесс до последнего времени оставался мало изученным.

Лишь в самые последние годы в литературе начали появляться работы, посвященные изучению отдельных частных вопросов скрубберного процесса.

Выпуском настоящей монографии преследуется цель восполнить существующий пробел в нашей литературе путем обобщения экспериментальных исследований автора и систематизации имеющихся разрозненных литературных данных.

В основу монографии положены результаты экспериментальных исследований, проводившихся автором в течение ряда лет на укрупненных лабораторных установках в Московском ордена Ленина химико-технологическом институте им. Д. И. Менделеева и частично на заводах.

Задачей этих исследований явилось комплексное изучение общих для всех аппаратов скрубберного типа вопросов, связанных с гидравлическими условиями течения газа и жидкости в насадках, и вопросов теплопередачи при непосредственном соприкосновении газа и жидкости на поверхности насадки.

Исследования проводились с целью получения данных, которые могли бы быть положены в основу рациональных методов проектирования и наиболее эффективной эксплуатации и интенсификации скрубберных установок.

Выбор темы был продиктован насущными требованиями проектных организаций и промышленности.

В экспериментальных исследованиях автора в разное время принимали участие т.т. Голубец В. А., Нефедова И. Д., Добровольская Н. В., Зильберг В. И. и Фурмер И. Э., которым автор выражает глубокую благодарность.

И. Э. Фурмер принимала непосредственное участие в составлении V главы.

В настоящей монографии автор не претендует на исчерпывающую разработку всех вопросов темы и все замечания как по содержанию книги, так и по направлению дальнейших исследований примет с искренней признательностью.

Г Л А В А I

СУЩНОСТЬ СКРУББЕРНОГО ПРОЦЕССА И ЗАДАЧИ ДАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И КЛАССИФИКАЦИЯ СКРУББЕРОВ

Скрубберный процесс является одной из наиболее распространенных форм процесса абсорбции и находит весьма широкое применение в промышленности.

Абсорбционные процессы являются важнейшей стадией в технологии изготовления серной, азотной и соляной кислот, кальцинированной соды, продуктов коксохимического и нефтегазового производства и пр. Многочисленные методы очистки газов и разделения газовых смесей в металлургической, газовой и нефтяной промышленности, в производстве синтетического аммиака, метанола, синтетического каучука и др., также базируются на процессах абсорбции. В последние годы абсорбционные методы стали широко применяться для извлечения сернистого ангидрида из дымовых газов крупных электростанций, для улавливания бензина и газа из природных газов и т. д.

Сущность процесса абсорбции заключается в поглощении газа жидкостью. Основными определяющими моментами этого процесса являются: 1) равновесие, как предел, к которому стремится система, и 2) скорость приближения к этому пределу. В производственных условиях чаще всего решающим моментом является второй.

При применении абсорбционных методов весьма важно правильно подойти к выбору аппаратуры, обеспечивающей наиболее эффективное использование процесса.

Основные уравнения кинетики абсорбции показывают, что количество вещества, абсорбированного в единицу времени, прямо пропорционально поверхности контакта между материально обменивающимися средами. Следовательно, важнейшим требованием, предъявляемым к абсорбционным аппаратам, является создание условий тесного контакта между газом и жидкостью.

При выборе типа абсорбционного оборудования в каждом конкретном случае необходимо руководствоваться не только физико-

химическими условиями проведения процесса, но и учитывать также требования экономики — минимальные капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

В капитальные затраты включается стоимость оборудования, фундаментов, абсорбента, насосов, газодувок, трубопроводов. В тех случаях, когда абсорбционные процессы сопровождаются тепловыми процессами, следует также учесть стоимость вспомогательных подогревателей, холодильников и теплообменников. В текущие расходы по эксплуатации входят: энергия для циркуляции газа и абсорбента, текущий ремонт, рабочая сила, пар и вода для охлаждения.

В отличие от других видов типовой химической аппаратуры, абсорбционная аппаратура, как правило, не стандартизирована. Если фильтры, теплообменники, сушилки, выпарные аппараты, дробилки, мельницы, мешалки и другие виды химической аппаратуры обычно проектируются и изготавливаются специальными машиностроительными заводами, то абсорбционное оборудование часто, если не всегда, проектируется и изготавливается для каждой конкретной установки отдельно.

В результате этого абсорбционное оборудование, используемое в промышленной практике, весьма разнообразно как с точки зрения конструкции, так и главным образом размеров.

Абсорбционная аппаратура, применяемая в настоящее время в промышленности, может быть разделена приблизительно на следующие основные группы:

1) барботирующие абсорберы, в которых газ барботирует через массу жидкости;

2) абсорбционные камеры с разбрызгиванием, в которых жидкость разбрызгивается в массе газа;

3) поверхностные абсорберы, в которых газ пропускается над поверхностью жидкости, находящейся в соответствующем резервуаре, причем газ и жидкость подаются по принципу противотока;

4) абсорберы, содержащие механически вращаемые части для разбрызгивания жидкости и обеспечения лучшего соприкосновения ее с газом (механические скрубберы);

5) абсорбционные колонны с колпачковыми или сетчатыми тарелками, подобные применяющимся для ректификации и дестилляции;

6) абсорбционные башни или скрубберы с насадкой для развития большой поверхности соприкосновения жидкости с газом.

Для абсорбции наиболее часто применяются аппараты шестой и отчасти пятой групп.

Описание устройств и схем конструкций различных абсорберов дано в книгах и монографиях А. Г. Касаткина¹, Уокера, Льюиса и Мак-Адамса², Д. Перри³, Беджера и Мак-Кеба⁴, К. М. Малина⁵, И. Н. Кузьминых⁶, С. И. Вольфовича⁷, Д. А. Эпштейна⁸, В. Д. Гинзбурга⁹ и др.

Аппараты первой и второй группы применяются сравнительно

редко. Барботаж газа через жидкость является методом, эффективным только в тех случаях, когда главное сопротивление абсорбции представляет пограничный слой жидкости. При этом поднимающиеся пузырьки газа непрерывно проходят через свежую поверхность жидкости, что сводит к минимуму образование вокруг пузырька поверхностной пленки жидкости, в которой концентрация растворенного газа была бы больше, чем внутри жидкости. Вследствие этого такие аппараты находят применение для абсорбции практически чистых газов, а также газов, обладающих относительно низкой растворимостью, безотносительно к концентрации их в газовой среде. Для газов с малой растворимостью практически все сопротивление абсорбции представляет пограничный слой жидкости.

Абсорбционные камеры с разбрызгиванием применяются для поглощения таких газов, для которых главное сопротивление абсорбции представляет пограничный слой газа, т. е. для поглощения хорошо растворимых газов. Падающие капельки жидкости проходят непрерывно через свежий газ, что сводит к минимуму образование градиента концентрации поглощаемого газа в слое, непосредственно окружающем каплю.

Поверхностные абсорберы применяются в том случае, когда процесс абсорбции сопровождается выделением больших количеств тепла. Классическим примером этого случая является абсорбция хлористого водорода водой. При этой реакции выделяется настолько большое количество тепла, что применение другого типа аппарата не обеспечивает быстрый отвод тепла реакции и поддержание достаточно низкой температуры жидкости, необходимой для получения кислоты желательной концентрации. До недавнего времени для абсорбции хлористого водорода водой применялись серии последовательно включенных керамических сосудов Вольфа или турилл Целляриуса, в которых вода двигалась противотоком к газу. Поглотительная способность отдельной туриллы невелика, а рассеяние тепла абсорбции в окружающую среду незначительно, вследствие чего установка получалась очень громоздкой. В последнее время эти системы заменяются более эффективными. В частности, такой системой в производстве соляной кислоты является тайлеровский абсорбер «Витреозиль»^{*}).

Существуют и другие типы абсорбционного оборудования для случаев, когда процесс абсорбции сопровождается выделением значительных количеств тепла; некоторые из них представляют собой охлаждаемые изнутри колонны с насадкой или с тарелками и т. п. В качестве примера таких абсорберов можно привести тарельчатую абсорбционную колонну для окислов азота при получении азотной кислоты по методу Дюпон.

Указанный метод отвода тепла абсорбции осуществляется лишь

^{*}) Схему см. Перри, «Справочник инженера химика», 1937 г., т. 1, стр. 601.

в металлических колоннах, так как керамические конструкции были бы слишком громоздки.

В механических скрубберах тесный контакт между фазами осуществляется применением механического перемешивания. Представителем аппаратов этого типа может служить скруббер Фельда, применяемый для абсорбции хорошо растворимых газов небольшим количеством жидкости.

Для этих же целей применяется также центрофугальный скруббер Маклорена*).

Новейшим видоизменением скруббера Фельда является газопромыватель Бартлет-Хейуорда**).

В газовой промышленности, например, в английском способе сушки светильного газа глицирином, находят применение горизонтальные скрубберы с механическим перемешиванием***).

Различные типы скрубберов с вращающимися частями для образования межфазовой поверхности не получили широкого распространения, так как они требуют механического привода помимо газодувки и насоса, что связано с повышенным расходом энергии.

Абсорбционные колонны с тарелками по конструкции и принципу работы в основном не отличаются от колонн, применяемых для ректификации и дистилляции. Газ, подлежащий обработке, вводится через нижнюю часть колонны, поднимается вверх и барботирует через жидкость на каждой тарелке. Абсорбент вводится через верхнюю часть и стекает с тарелки на тарелку по вертикальным переливным трубам, соединяющим каждую тарелку с нижеследующей. Поскольку объем жидкости, протекающей вниз по абсорбционной колонне, будет в общем значительно больше, чем объем жидкости, стекающей в виде флегмы ректификационной колонны, обычно предусматривают переливные трубы значительно большего диаметра, что позволяет избежать переполнения колонны.

Тарелки абсорбционной колонны имеют один большой колпачок или чаще — несколько небольших колпачков. В последнем случае колпачки не всегда делают с круглым сечением и часто имеют четырехугольную или трапециoidalную форму сечения.

При работе колонны газ входит снизу через вертикальные подающие трубки в колпачки и, понижая уровень жидкости в колпачках, барботирует через отверстия, прорезанные по периферии каждого колпачка. Газ проходит через эти отверстия с большой скоростью, разбивая жидкость на неправильные пузырьки различных размеров и формы. При этом сам газ также разбивается на достаточно малые пузырьки, так что получается большая межфазовая поверхность, обеспечивающая быструю абсорбцию.

Если в орошающей жидкости присутствуют суспендированные твердые продукты, то небольшие размеры прорезов в колпачках, применяемых при ректификации, могут вызвать засорение проре-

*) Уокер, Льюис и Мак-Адамс², стр. 264.

**) Перри³, стр. 616.

***) Касаткин¹, стр. 535.

зов. В таких случаях обычно делается только один большой колпак, борт которого, обращенный к тарелке, делается зазубренным. Такая конструкция колпачков, называемых пассетами, применяется в карбонизационных колоннах Сольве в содовом производстве. В абсорбционных тарельчатых колоннах применяются колпачки различных размеров от небольших с диаметром 75 мм с вертикальными прорезами шириной в 5 мм до больших чугунных полусферических колпачков с 50-мм отверстиями, рассчитанными для работы со шламом.

Для получения аналогичного барботирующего эффекта можно, кроме колпачков, применить сетчатые и пористые тарелки. Сетчатые тарелки представляют собой мелко и густо перфорированные металлические листы. При работе с ними необходимо поддерживать определенный уровень жидкости на тарелке; в противном случае возникает опасность образования несмоченных каналов и проскока газа. Сетчатые тарелки действуют надежно лишь в довольно узком интервале скоростей газа.

Пористые керамические тарелки применяются для аэрации сточных вод и особенно эффективны в раздроблении газа на мелкие пузырьки. Однако, пористые тарелки представляют собой большое сопротивление для газа. Например, падение напора газа при прохождении через обычную грубую керамическую тарелку при скорости газа в 0,3 м/сек составляет приблизительно 100 мм водяного столба. Это заставляет располагать тарелки на большом расстоянии друг от друга, что делает колонну очень высокой. Обычно расстояние между тарелками в колоннах составляет от 150 до 1 000 мм в зависимости от склонности жидкости пениться и разбрызгиваться.

В больших колоннах корпус часто предусматривается с лазами между тарелками для очистки колонны в случае надобности. Переливные трубы для жидкости на последовательно расположенных тарелках обычно располагаются попеременно с противоположных сторон. Таким образом, жидкость, стекающая с верхней тарелки, должна пересечь всю тарелку, чтобы достигнуть водослива. Однако, даже при таком устройстве имеется известная тенденция к «короткому замыканию» жидкости непосредственно от одной сливной трубы к следующей. Эту трудность можно частично преодолеть с помощью различных приспособлений в виде пластин, предназначенных для направления движения жидкости через тарелку. Скорость движения жидкости в башне с тарелками зависит от пропускной способности сливных труб. При высоких скоростях жидкости можно установить несколько сливных труб, хотя опасность «короткого замыкания» жидкости по тарелке может быть более серьезной в том случае, когда расстояние, проходимое жидкостью, невелико.

При больших скоростях газа в колонне с тарелками имеет место значительный механический унос жидкости с одной тарелки на другую, вызывающий разбавление жидкости. Унос жидкости может существенным образом влиять на процесс ректификации. Однако, он, повидимому, не играет существенной роли в абсорбе-

рах с тарелками при любых скоростях газа ниже той, при которой колонна перестает работать вследствие вспенивания жидкости вверху колонны, захлебывания или закупоривания сливных труб.

Одну из разновидностей абсорбционной колонны с тарелками представляет собой скруббер Лимна, применяемый в газогенераторных установках для охлаждения газов.

В этом скруббере тарелка представляет собой или горизонтальную пластину с отверстием посередине или имеет форму перевернутого усеченного конуса. Между тарелками помещаются горизонтальные или конические диски, насаженные на вал и поддерживаемые в центре колонны. Диаметр дисков несколько больше, чем отверстия тарелок. Жидкость спадает каскадом вниз колонны, протекая через большие центральные отверстия тарелки на центральный диск, расположенный под ней. Затем жидкость с периферии диска падает на круглую тарелку и т. д.

Таким образом, жидкость стремится падать с одной тарелки на другую в виде вертикальной цилиндрической поверхности, через которую газ должен прокладывать себе путь.

Достоинством такого типа скруббера является малая потеря напора газа и возможность работать с относительно небольшим количеством орошающей жидкости и с газами, сильно загрязненными механическими примесями твердых частиц.

2. БАШНИ С НАСАДКОЙ ИЛИ СКРУББЕРЫ

Наиболее распространенным типом абсорбционного оборудования является башня с насадкой или скруббер. Эти аппараты очень просты по устройству, относительно дешевы и удобны в эксплуатации.

Скрубберы с насадкой широко применяются также для целей десорбции, т. е. извлечения из жидкости растворенного в ней компонента путем пропускания инертного газа; для увлажнения газов, в частности, в установках по кондиционированию воздуха, для нагревания или охлаждения газа путем прямого контакта с жидкостью, т. е. используются как теплообменные аппараты. В последнем случае они могут рассматриваться как теплообменники смешения.

Область применения скрубберов с насадкой для охлаждения газов исключительно велика. Они применяются для охлаждения генераторных, доменных (колошниковых), коксовых газов и пр. В некоторых химических производствах, как, например, в производстве водорода конверсионным методом на заводах синтетического аммиака, скрубберы с насадкой используются в качестве сатурационных башен, в которых, благодаря циркуляции горячей воды, производится нагревание газа и насыщение его водяными парами.

О масштабах применения скрубберов в промышленности могут дать представление следующие примеры. На каждую тонну выплавляемого чугуна в доменных печах получается около 4 000 м³ колош-

никовых газов. При коксовании углей на каждую тонну кокса получается около 350 м³ коксового газа. При современных масштабах выплавки чугуна и выжиги кокса количество получаемых газов измеряется миллиардами куб. метров. Эти газы с той или иной целью проходят стадию обработки в скрубберах. Неменьшие количества газов подвергаются обработке в скрубберах в газовой и нефтяной промышленности. В химической промышленности для производства синтетического аммиака, метанола, азотной кислоты, серной кислоты и ряда других продуктов приходится обрабатывать в скрубберах и башнях тысячи кубических метров газов на каждую тонну получаемого продукта. Во многих химических производствах башни с насадкой являются основным технологическим оборудованием.

В различных отраслях современной промышленности суммарные количества газов, обрабатываемых в скрубберах и башнях, исчисляются тысячами миллиардов кубических метров. Это связано с огромными эксплуатационными расходами и капитальными затратами на строительство скрубберных и башенных установок. Так, например, стоимость отдельных башенных установок крупных серноокислотных и азотнокислотных заводов составляет 10—15 миллионов рублей и выше.

Конструктивно скруббер состоит из вертикального, обычно цилиндрического, корпуса, установленного на соответствующем фундаменте. Внизу и вверху, на боковой стенке скруббера имеется по два отверстия со штуцерами для ввода и вывода орошающей жидкости и газа. Внутри скруббера на расстоянии 1½—3 м от нижнего днища располагается колосниковая решетка, на которой помещается насадка, обеспечивающая необходимую поверхность контакта. Форма, размеры, а также характер скрубберных насадок весьма разнообразны. Наиболее распространенным типом насадки для скрубберов является: кусковой материал (кварц, кокс, щебень), тела правильной геометрической формы (кольца Рашига, седлообразная насадка Берля, шары, плитки и пр.) и деревянные решетки. Важнейшим требованием, предъявляемым к скрубберной насадке, является максимальная поверхность в единице объема при минимальном сопротивлении слоя насадки прохождению газового потока. Чем меньше сопротивление насадки, тем меньше расход энергии на проталкивание газа через абсорбционную систему. Сопротивление скрубберной насадки тем меньше, чем больше свободный объем насадки. Сопротивление насадки возрастает с увеличением интенсивности орошения. При прочих равных условиях сопротивление меньше в случае применения более аэродинамически обтекаемой насадки. Как правило, аппараты скрубберного типа работают по принципу противотока: орошающая жидкость (абсорбент) нагнетается вверх скруббера и стекает вниз по насадке тонкими пленками навстречу газу, проходящему снизу вверх через свободные промежутки между смоченными элементами насадки. Однако, если газовая фаза полностью состоит из одного только поглощаемого

газа или если абсорбирующая жидкость такова, что равновесное давление поглощаемого газа над ней равно нулю (вследствие, например, происходящей химической реакции), то в противотоке нет никаких преимуществ.

Размеры применяемых в промышленной практике скрубберов колеблются в весьма широких пределах: внутренний диаметр от 300—400 мм до 10—12 м, высота от 2 до 25 м. При проектировании скрубберов следует иметь в виду, что соотношение между высотой насадки башни и внутренним диаметром (Н/Д) должно быть не меньше 3 и не больше 6—8. При меньших соотношениях часто не может быть достигнута необходимая полнота абсорбции; при больших соотношениях имеется опасность (вследствие тенденции орошающей жидкости стекать постепенно к периферии, собираясь у стенок скруббера) неравномерного распределения жидкости в насадке скруббера, а стало быть, неэффективного использования насадки. Высота скрубберов, превышающая 20—25 м, не желательна и, если по расчету необходимо иметь скруббер высотой больше 25 м, то необходимо разделить его на 2—3 отдельных последовательно включенных скруббера, суммарная высота которых равна рассчитанной. В случае необходимости здесь может быть полностью сохранен принцип противотока путем постепенного нагнетания орошающей жидкости с последней по ходу газа башни к первой навстречу газу.

В некоторых случаях количество абсорбирующей жидкости, необходимое на 1 объем газа и на 1 м² площади поперечного сечения скруббера, бывает настолько мало, что это количество может оказаться недостаточным для орошения всей насадки. В этих случаях обычно применяют частичную рециркуляцию раствора через башенную насадку. Небольшое количество свежей абсорбирующей жидкости может добавляться вверху башни и соответствующее количество раствора должно выводиться из сборника у основания башни. В целях создания искусственным путем эффекта настоящего противотока применяют несколько башен, включенных последовательно. В последнем случае раствор течет из башни в башню в противотоке к газу. Этот принцип положен в основу производства азотной кислоты путем абсорбции окислов азота из нитрозных газов, получаемых контактным окислением аммиака.

Если количество раствора, проходящего через систему, невелико по сравнению с повторно циркулирующим, то изменение концентрации раствора от вершины до дна любой башни будет небольшим и, таким образом, принцип противотока в каждой отдельной башне до известной степени утрачивает свой смысл. В таких случаях, в целях экономии газопроводов, можно допускать попеременное прохождение газа вверх и затем вниз через последовательно включенные башни. Часто в целях экономии места система из нескольких последовательно включенных башен заменяется одной башней большого диаметра, разделенной вертикальными перегородками на ряд секций, играющих в данном случае роль самостоятель-

х б ашен. Газ проходит первую секцию снизу вверх, поступает через отверстие в верхней части перегородки во вторую секцию, которую проходит сверху вниз, через отверстие внизу перегородки поступает в третью секцию и т. д. Такие секционные башни также применяются в азотнокислотном производстве для поглощения окислов азота из нитрозных газов. В том же азотнокислотном производстве применяются башни системы Паулинга, в которых весьма оригинально разрешается вопрос орошения насадки малым количеством жидкости.

Внутреннее пространство башен Паулинга разделено радиальными вертикальными перегородками на 4 и более секций. Газ, поступающий под колосниковую решетку башни, направляется параллельно во все секции башни. Орошение отдельных секций осуществляется периодически с помощью вращающегося на центральной оси ковша. В тот момент, когда ковш находится над первой секцией, он наполняется орошающей жидкостью, затем опрокидывается и жидкость орошает насадку 1-й секции. После этого ковш поворачивается с помощью специального механизма, занимает положение над второй секцией, и все операции повторяются. Число оборотов ковша согласовано со скоростью стекания жидкости по насадке. Ковш делает полный оборот за время, которое необходимо для стекания жидкости из насадки первой секции. Такая система орошения обеспечивает большую полноту смачивания насадки, так как за каждую операцию удастся сосредоточить на меньшей площади орошения большее количество жидкости.

В качестве материала для изготовления скрубберов в настоящее время широко применяется обычное котельное железо, специальные стали, дерево, керамика, естественные камни. Характер строительного материала определяется условиями проведения процесса и характером среды, в которой протекает процесс. Если процесс абсорбции осуществляется при повышенном давлении, то скруббер изготавливается из стали. Так, например, для очистки конвертированного газа от CO_2 отмывкой водой под давлением 16 атм применяются скрубберы из сварочной стали высотой 16 м с наружным диаметром 2500 мм и толщиной стенок 40 мм. Для очистки азот-водородной смеси от окиси углерода абсорбцией медно-аммиачными растворами под давлением 120 атм применяются стальные кованые скрубберы общей высотой до 16 м с наружным диаметром 800 мм и толщиной стенок 100 мм.

Башни Гловера, Гей-Люссака и стабилизаторы в сернокислотных установках изготавливаются из листового свинца с внутренней футеровкой из кислотоупорного кирпича. Для изготовления башен азотнокислотных установок наряду с кислотоупорной хромоникелевой сталью широко применяется керамика, кислотоупорный кирпич, блоки из кварца и андезита. Последние при изготовлении корпусов больших башен связываются кислотоупорным известковым раствором, обычно на основе жидкого стекла. В установках производства азотной кислоты под давлением по методу Дюпон применя-

ются абсорбционные башни, корпуса которых сделаны из высокохромистой стали. Материал в этом случае должен быть стоек против коррозионного действия слабой азотной кислоты, а также должен обладать достаточной механической прочностью, так как процесс абсорбции проводится под давлением 7—8 атм.

Во всех случаях, когда опасность коррозии материала недостаточно серьезна, материалом для изготовления скрубберов служит сталь-3 или обычное котельное железо. Железные скрубберы широко применяются как в качестве абсорберов, так и в качестве холодильников и теплообменных аппаратов.

Если скруббер изготавливается из кварца, андезитовых плит или кирпича, то не всегда удастся получить круглую форму его сечения. Круглая форма сечения скруббера является более удобной и более распространенной; она всегда применяется в случае изготовления скрубберов из металла.

При применении же кирпича в ряде случаев приходят к выбору квадратной формы сечения, так как она позволяет применять стандартный кирпич.

В скрубберах квадратного сечения почти невозможно добиться равномерного распределения газа по поперечному сечению из-за наличия углов; кроме того, квадратное сечение скруббера дает и меньшую устойчивость его, что является в общем большим недостатком. Поэтому в тех случаях, когда при изготовлении крупных башен затруднительно получить круглую форму сечения (например, при применении в качестве строительного материала крупных андезитовых блоков) сечению башни придают форму восьми- или двенадцатиугольника.

Для обеспечения хорошей работы скруббера существенное значение имеет равномерное и, по возможности, полное смачивание насадки скруббера орошающей жидкостью. Равномерность распределения орошающей жидкости по поперечному сечению скруббера в значительной степени зависит от типа оросительного устройства. Наиболее распространенными типами оросительных устройств, применяемыми в промышленности, являются: 1) распылители Кертинга; 2) центробежные турбинки со звездочкой ОЗАГ (Петерсена); 3) стаканы Браузе или грушевидные перфорированные оросительные устройства; 4) паукообразные трубчатые оросительные устройства; 5) водораспределительные плиты.

Описание первых трех типов оросительных устройств дано в курсе К. М. Малина⁵ «Технология серной кислоты и серы». Они находят широкое применение в сернокислотной промышленности. Исследованию работы центробежных турбинок ОЗАГ посвящена обстоятельная работа К. А. Полякова и В. Я. Гальцова¹⁰. Методика расчета стаканов Браузе дана в работе Илинича и Розвал¹¹.

Исследования и опыт заводской эксплуатации показывают, что каждый из первых трех типов оросительных устройств обладает рядом существенных недостатков. Так, например, недостатками распылителей Кертинга являются: малая производительность, лег-

кая засоряемость, необходимость подачи жидкости под некоторым напором, что связано с затратой энергии. Кроме того, для орошения насадки скруббера нет необходимости в предварительном тонком распылении жидкости, так как в самой насадке жидкость движется в виде непрерывных струек или тонких пленок и поэтому работа распыления жидкости в данном случае пропадает даром. Тонкое распыление жидкости над насадкой имеет также и тот недостаток, что связано с большим уносом жидкости из скруббера с выходящим газовым потоком и требует устройства вверху скруббера специальных отбойников и ловушек для брызг, кстати не всегда обеспечивающих полное удаление жидкости из газа. Последний недостаток в известной мере относится и к центробежным турбинкам Петерсена. Как показали опыты Полякова и Гальцова, с помощью одной турбинки невозможно обеспечить равномерное орошение всего поперечного сечения скруббера. Для выполнения последнего условия необходимо перекрестное орошение с помощью нескольких турбинок, установленных в шахматном порядке. Производительность отдельных турбинок обычно невелика. Применение турбинок целесообразно лишь в случае орошения больших площадей малым количеством жидкости при условии перекрестного действия нескольких турбинок.

Недостатком стаканов Браузе и грушевидных перфорированных оросительных устройств является изменение конуса орошения в зависимости от колебания напора поступающей на орошение жидкости. Впрочем, при работе скруббера при атмосферном давлении, этот недостаток легко устраняется установкой напорного бачка с постоянным уровнем. Наиболее существенным недостатком стакана Браузе являются частые в практике случаи засорения отдельных отверстий, что влечет за собой существенное нарушение равномерности орошения. Тем не менее, благодаря простоте устройства, стаканы Браузе и грушевидные перфорированные оросители находят широкое применение в промышленной практике. Наилучшими, с нашей точки зрения, и вполне оправдавшими себя в промышленной практике являются паукообразные трубчатые оросительные устройства и водораспределительные плиты. Они универсальны и пригодны для любого типа насадки, в том числе и для хордовой решетчатой насадки. Для последней первые три типа оросительных устройств совершенно неприемлемы, так как вследствие направления движения отдельных капелек жидкости под некоторым углом к горизонту, значительная часть жидкости отбрасывается к стенкам скруббера, причем рейки решеток служат своего рода направляющими, что приводит к неравномерности орошения скруббера. Для равномерного орошения хордовой насадки необходимо, чтобы жидкость орошала насадку вертикальными струйками; это достигается при применении двух последних типов оросительных устройств. Паукообразный ороситель представляет собой пучок вертикальных труб, расположенных в шахматном порядке или по концентрическим окружностям и соединенных с системой горизонтальных разветвля-

ющихся труб, которые, в свою очередь, собираются в один общий коллектор для подвода орошающей жидкости. Для регулирования интенсивности и равномерности орошения часто каждая вертикальная орошающая трубка снабжается вентилем.

Орошение с помощью распределительной плиты осуществляется следующим образом: внутри скруббера на некотором расстоянии от верха насадки на кольцо из углового железа укладывается перфорированная плита; отверстия в плите располагаются в шахматном порядке (количество отверстий и их размер рассчитывают, исходя из пропускной способности скруббера по жидкости); сверху плиты располагается труба с щелевым вырезом для подвода жидкости; при достаточном подводе жидкости последняя накапливается до определенного уровня на плите и, равномерно вытекая из отверстий плиты, орошает насадку. Количество жидкости, проходящей через плиту, является функцией числа отверстий, размера отверстий и высоты слоя жидкости, находящейся в данный момент на плите.

Для отвода газа из скруббера в плите развальцовывается определенное количество вертикальных патрубков, верхние (обычно скошенные) концы которых должны находиться выше уровня жидкости на плите. В 1938 г. сотрудником Гипроазота И. Шулятиковым¹² было проведено обследование скрубберов водной абсорбции CO_2 цеха очистки одного из азотно-туковых заводов. Объектом обследования были два скруббера, из которых один был снабжен грушевидным перфорированным оросительным устройством, а второй — распределительной плитой. В совершенно аналогичных условиях работы второй скруббер показал значительно лучшую степень очистки газа от CO_2 , чем первый. Объясняется это только лучшей системой орошения, обеспечивающей более равномерное распределение жидкости в насадке и большую полноту смачивания насадки.

3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АБСОРБЕРОВ

Давая сравнительную оценку упомянутым выше конструкциям абсорбционных аппаратов, целесообразно свести их к двум группам. К первой группе должны быть отнесены скрубберы с насадкой, а ко второй — все остальные абсорберы, за исключением поверхностных аппаратов.

К недостаткам второй группы аппаратов в сравнении с первой, следует отнести: 1) слабое перемешивание газа в аппарате; 2) снижение эффективности работы вследствие тенденции диспергированной жидкости агрегироваться в крупные капли; 3) незначительное время соприкосновения жидкой и газовой среды.

Поверхностные абсорберы по сравнению с насадочными обладают рядом преимуществ, из которых наиболее существенными являются: 1) простота устройства и легкость обслуживания; 2) незначительная затрата энергии на осуществление процесса.

Несмотря на это, применение поверхностных абсорберов огра-

ничено, так как посредством их можно осуществить лишь абсорбцию очень хорошо растворимых газов, в то время как трудно и средне растворимые газы в них абсорбированы быть не могут.

Из второй группы технически наиболее совершенными являются тарельчатые абсорберы.

Сравнение тарельчатых абсорберов с насадочными не может привести к однозначному ответу, так как и те и другие обладают своеобразными достоинствами и недостатками, заставляющими в одних случаях их применять, в других — отказываться от их применения.

Относительные преимущества и недостатки тех и других можно кратко сформулировать следующим образом:

1) скрубберы с насадкой обладают рядом преимуществ: простота устройства, дешевизна, легкость обслуживания и ремонта; кроме того (что особенно важно), для устройства насадочных скрубберов может быть применен любой материал (железо, дерево, керамика, кварц, андезит и т. п.), в то время как тарельчатые колонны, как правило, могут быть выполнены лишь из металла или в некоторых случаях из стекла пайрекс;

2) при работе с одинаковой нагрузкой падение напора газа в башне с насадкой значительно меньше, чем в башне с тарелками;

3) в колоннах с тарелками меньше вероятность образования каналов, в которых контакт газа и жидкости отсутствует;

4) колонны с тарелками можно применять для работы с такими скоростями жидкости, при которых скрубберы с мелкой насадкой захлебываются;

5) колонну с тарелками, снабженную лазами, можно периодически очищать от осадков и отстоя, тогда как засорение скрубберной насадки вызывает необходимость выгрузки всей насадки и заполнения скруббера насадкой вновь, что является часто трудоемкой операцией и связано с большими расходами;

6) башню с тарелками можно легко снабдить приспособлениями для охлаждения жидкости с целью удаления тепла абсорбции, например, либо путем устройства змеевиков - холодильников на тарелках, либо с помощью выносных наружных холодильников, через которые пропускается жидкость при стекании с одной тарелки на следующую;

7) количество жидкости, задерживающейся в скруббере с насадкой во время работы, значительно меньше, чем в колонне с тарелками;

8) при равной производительности общий вес колонны с тарелками меньше, чем башни с насадкой.

Несмотря на преимущества в ряде случаев тарельчатой колонны по сравнению с насадочным скруббером, последний, как уже указывалось выше, применяется несравненно чаще и шире и является основным и универсальным аппаратом абсорбционных процессов. Наряду с этим, скруббер с насадкой весьма широко применяется и как теплообменный аппарат (теплообменник, холодильник, конденсатор смешения, сатуратор или увлажнитель).

3283-16

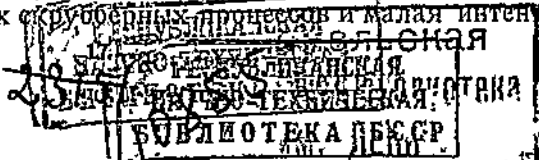
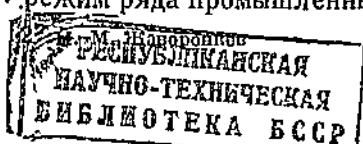
4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ДАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на широкое и разностороннее применение аппаратов скрубберного типа и многолетнюю практику их эксплуатации в промышленности, скрубберный процесс до самого последнего времени оставался весьма мало изученным. Научно-исследовательская работа в области скрубберных процессов сильно отстает и далеко не соответствует той роли, которую последние играют в промышленности. Проектирование и строительство скрубберных установок за отсутствием необходимых данных часто основывалось исключительно на интуиции проектировщиков. Это положение в известной мере сохранилось и до настоящего времени, в результате чего до сих пор не установлены общие принципы проектирования и строительства скрубберных установок. С другой стороны, чересчур общий в некоторых случаях подход к проектированию, без учета специфических условий отдельных абсорбционных процессов приводил к весьма неэффективному использованию скрубберных установок на практике.

Так, например, по условиям работы промышленные скрубберы, предназначенные для обработки больших количеств газа при малой интенсивности орошения, и скрубберы, перерабатывающие относительно умеренные количества газа при значительной интенсивности орошения, довольно резко отличаются друг от друга. Однако, до последнего времени эта разница не находила достаточно четкого отражения ни в конструкции скруббера, ни в выборе типа насадки и оросительного устройства. Разница в конструкции скрубберов, предназначенных для работы при атмосферном давлении и при повышенном давлении, заключалась только в большей механической прочности стенок скруббера, рассчитанного на повышенное давление.

При всем разнообразии и сложности явлений, имеющих место в скрубберах и башнях с насадкой в зависимости от их технологического назначения (абсорбция, десорбция, теплообмен и пр.) целый ряд явлений чисто гидродинамического порядка, являющихся следствием движения жидкости и газа, может быть признан общим для всех аппаратов скрубберного типа и определяющим собой понятие «скрубберного процесса».

Оптимальный технологический режим процессов абсорбции и теплопередачи, интенсивность процесса, производительность, расход энергии и пр. в аппаратах скрубберного типа определяются на практике в подавляющем большинстве случаев не технологическими, а гидродинамическими условиями работы. Однако, вследствие неизученности процесса и отсутствия необходимых данных, вопросы гидродинамики совершенно игнорировались при проектировании и строительстве скрубберных установок. В лучшем случае проектирование основывалось на химико-технологических показателях процесса, осуществляемого в скруббере. Следствием этого являлись, как показали исследования последних лет, неправильный режим ряда промышленных скрубберных процессов и малая интен-



сивность скрубберных аппаратов. Работы, как за границей,¹ так и в СССР, по интенсификации отдельных производств, базирующихся на скрубберных аппаратах, были во всей широте поставлены 10—15 лет назад. За эти годы у нас достигнуты значительные успехи в области интенсификации производства серной кислоты нитрозным способом (работы Шульца В. Н., Кузьминых И. Н., Малина К. М. и др.) и азотной кислоты (работы Усюкина И. П. и др.). В том и в другом случаях работы проводились в направлении интенсификации главным образом абсорбционной части установок, т. е. башенного хозяйства. В этих работах главное внимание было уделено отысканию и установлению оптимальных условий технологического процесса производства путем изменения температурного режима, изменения концентрации орошающих кислот и некоторого перераспределения орошения по отдельным башням, а также попытки отделения окислительных процессов (окисление NO в N_2O_3 в нитрозном серноокислотном процессе) от чисто абсорбционных путем введения в систему свободного окислительного объема в виде пустых неорошаемых башен.

Работы по интенсификации производства серной и азотной кислот позволили значительно увеличить мощность наших башенных серно-кислотных установок и абсорбционной части некоторых азотно-кислотных установок. Тем не менее этими работами не были полностью установлены все возможности для дальнейшего увеличения производительности промышленных систем, не были установлены пределы интенсификации. Прогнозы отдельных исследователей о возможностях дальнейшего повышения интенсивности промышленных систем весьма разноречивы. Высказывались, например, мнения о возможности повышения производительности абсорбционной части азотнокислотных установок при существующем оборудовании и без существенных переделок системы в 2, 3, 5 и даже 10 раз. Такие разноречивые цифры, не подтвержденные достаточно убедительными экспериментальными данными, являются следствием незнания их авторов с гидродинамическими условиями работы скрубберов и башен с насадкой. Насколько важно знание гидродинамических условий работы скруббера, видно хотя бы из следующего примера. Интенсивность абсорбционных процессов возрастает с увеличением поверхности контакта между жидкой и газовой фазами. С этой точки зрения применение более мелкой насадки для заполнения скрубберов должно привести к увеличению интенсивности за счет увеличения поверхности контакта в единице объема. Однако, часто это приводит к противоположным результатам. Применение очень мелкой насадки влечет за собой резкое увеличение сопротивления системы, следствием чего является уменьшение пропускной способности скруббера по газу и жидкости, а стало быть, снижение интенсивности единицы объема аппарата.

Неверные предпосылки, положенные в основу проектирования многих существующих промышленных скрубберных установок, обусловленные незнанием факторов, управляющих процессами, яви-

лись причиной невозможности наиболее эффективного использования этих установок и дальнейшей интенсификации их без значительной реконструкции. Так, например, часто мощность транспортирующих средств для газа и жидкости (газодувки, насосы) не соответствует (резко отстает) от пропускной способности самих башен или скрубберов. Это имело место, в частности, при проведении проф. Шульц В. Н. работы по интенсификации башенной сернокислотной установки завода им. Войкова. Существующий вентилятор оказался недостаточным для транспортирования через систему повышенных количеств газа при интенсивной работе системы. Потребовалось устройство новой, более мощной вентиляционной установки. Однако, правильный выбор мощности последней был затруднен отсутствием необходимых для расчета данных по сопротивлению скрубберной системы при интенсивной работе. Чисто эмпирический подход в решении этого вопроса вызвал многократные переделки, связанные с потерей труда, материалов и времени.

Во многих промышленных скрубберных установках причиной невозможности резкого повышения эффективности работы является неправильно выбранная насадка и т. д.

Недостаточная изученность гидродинамических условий работы скруббера и отсутствие необходимых данных часто служили тормозом в проведении работ по интенсификации промышленных скрубберных систем, а иногда даже приводили к отрицательным результатам и являлись причиной аварий в производстве. Так, например, на одном из наших заводов синтетического аммиака в 1934—35 гг. чрезмерная перегрузка по жидкости и газу медно-аммиачного скруббера, установленного между 5-й и 6-й ступенью компрессора высокого давления, привела к выбросу медно-аммиачного раствора вместе с газом в 6-ю ступень компрессора (300 атм) и разрыву последней вследствие гидравлического удара. Эта авария вывела из строя значительную часть завода на 1½ месяца.

Результатами настоящего исследования установлено, что правильный научный подход к работе скрубберной установки позволяет значительно интенсифицировать процесс без существенного изменения технологического режима. Факторами, обеспечивающими интенсивное проведение скрубберного процесса в сочетании с минимальными эксплуатационными расходами, являются:

- 1) правильный выбор формы и размера насадки; при всех прочих условиях наилучшие результаты дает аэрогидродинамическая обтекаемая насадка;

- 2) правильно выбранная система орошения насадки, обеспечивающая максимальную степень смачивания;

- 3) правильное соотношение между высотой слоя насадки и диаметром скруббера;

- 4) правильное соотношение скоростей потоков газа и жидкости, обеспечивающее, с одной стороны, хорошую растекаемость жидкости по насадке, и, с другой стороны, гарантирующее скруббер от «захлебывания».

Сказанное выше с достаточной убедительностью свидетельствует о том, насколько важны данные по гидродинамике скрубберного процесса как для проектирования новых, так и для установления правильного технологического режима и выявления условий интенсификации существующих скрубберов и башен с насадкой.

Комплекс вопросов, связанных с гидродинамикой скрубберного процесса, и явился основной задачей данного исследования.

К числу этих вопросов относятся следующие:

1. Характеристика физических свойств наиболее употребительных типов скрубберной насадки (геометрическая форма, размеры, удельная поверхность, свободный объем, количество элементов в единице объема, вес и пр.).

2. Гидравлическое сопротивление скрубберных насадок (потери напора газа), пределы нагрузки скрубберов по жидкости и газу («захлебывание») и количество орошающей жидкости, удерживаемой насадкой.

3. Условия течения жидкости в тонких слоях и распределение орошающей жидкости по поверхности скрубберных насадок.

Систематизация данных о наиболее употребительных скрубберных насадках, определение основных физических констант и составление характеристики их необходимо потому, что данные, имеющиеся в литературе, подчас весьма противоречивы.

Изучение вопросов, связанных с потерями напора газа при прохождении его через насадку башен и скрубберов, делает возможным выявление условий, при которых гидравлическое сопротивление насадок является минимальным. Данные о гидравлическом сопротивлении насадок необходимы для вычисления мощности газодувок, эксгаустеров и пр. и расхода энергии на транспорт газа через скрубберную систему при различной интенсивности работы системы.

Энергия, необходимая для проталкивания газа через насадку, часто является главной статьей текущих расходов по эксплуатации скрубберных установок. Расход энергии пропорционален произведению количества газа за единицу времени на падение напора. Таким образом, данные о потере напора при различных скоростях газа для различных насадок имеют первостепенное значение для проектирования.

Правильный выбор скрубберной насадки, обеспечивающей максимальную эффективность процесса при минимальном сопротивлении для конкретных случаев применения скрубберов, является весьма важным фактором в снижении эксплуатационных расходов.

Изучение вопроса о сопротивлении скрубберных насадок важно с точки зрения приложения полученных результатов к проектированию других процессов, связанных с применением аппаратов, заполненных измельченными твердыми телами различной формы. В связи с широким внедрением в промышленную практику гетерогенного катализа за последние годы приобрели большое значение контактные аппараты, заполненные различными катализаторами. Катализаторы применяются чаще всего в виде небольших кусочков

неправильной формы, шариков, цилиндров и штампованных таблеток.

Данные о сопротивлении сухих (неорошаемых) скрубберных насадок различной формы позволяют подойти и к расчету сопротивления контактных аппаратов, заполненных различными катализаторами, газовых смесителей, кауперов, доменных и известково-обжигательных печей и пр.

Минимальные капитальные затраты при строительстве скрубберных установок должны обеспечиваться при проектировании правильным расчетом производительности скрубберов. Для этого необходимо знание пределов нагрузки скрубберов по газу и жидкости. Данные о пределах нагрузки необходимы также для интенсификации существующих установок, приводящей к снижению амортизационных и эксплуатационных расходов и к увеличению мощности производства без дополнительных капитальных затрат.

Предел для пропускной способности аппарата скрубберного типа определяется явлением, которое можно назвать «захлебыванием», или выбросом жидкости. При достаточно высоких скоростях газа на поверхности противотоком стекающей жидкости развиваются такие большие касательные усилия, что сила трения газа начинает превосходить силу тяжести жидкости. В результате начинается «обращенное» течение жидкости вверх, т. е. в направлении, совпадающем с движением газа, и затем выбрасывание ее из скруббера через выхлопную трубу вместе с газом. Это явление названо нами «захлебыванием». Оно имеет место в условиях, когда скруббер далек от заполнения его жидкостью целиком. «Захлебывание» наступает при определенной интенсивности орошения и зависит от скорости газового потока, типа насадки и физических свойств газа и жидкости (плотность, вязкость и т. д.).

Изучение зависимости «захлебывания» скруббера от интенсивности орошения, скорости газа, физических свойств газа и жидкости (плотность, вязкость) и типа насадки решает вопрос об установлении пределов нагрузки, т. е. степени интенсификации самых разнообразных промышленных скрубберных процессов.

Важное значение также имеет вопрос об объеме жидкости, заполняющей скрубберную насадку, который часто игнорируется при проектировании абсорбционных аппаратов. Однако, при большой интенсивности орошения полезный реакционный объем аппарата сильно уменьшается за счет заполняющей жидкости и поэтому при расчете аппарата необходимо вносить коррективы. Это особенно важно в тех случаях, когда абсорбционные процессы сопровождаются окислительными, для которых необходим реакционный объем, как, например, в азотнокислотных и сернокислотных башнях. Количество жидкости, заполняющей насадку, дает возможность также судить о степени смоченности насадки или полноте покрытия поверхности насадки пленкой текущей жидкости.

Изучение условий распределения орошающей жидкости в скрубберных насадках преследует цель выявления оптимальных условий

орошения и дает возможность судить о действительной поверхности контакта газа с жидкостью.

Решение указанных вопросов, наряду с их прикладным значением, представляет большой теоретический интерес, так как дает возможность подойти к разработке основ теории движения газа в трубах с насадкой.

Для проектирования и установления оптимального режима эксплуатации теплообменных аппаратов скрубберного типа необходимо, помимо данных гидродинамического порядка, знание коэффициентов теплопередачи.

Процесс теплопередачи в скрубберах с насадкой при непосредственном контакте жидкости и газа таюке оставался до самого последнего времени совершенно не исследованным.

Поэтому одной из задач данной работы являлось исследование процесса теплопередачи в теплообменниках скрубберного типа с целью определения коэффициентов теплопередачи и изучение зависимости их от гидродинамических условий работы скруббера.

Г Л А В А II

ХАРАКТЕРИСТИКА НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБИТЕЛЬНЫХ ТИПОВ СКРУББЕРНЫХ НАСАДОК

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СКРУББЕРНЫМ НАСАДКАМ

Характер насадки (материал, геометрическая форма, размеры и пр.) часто определяют собой эффективность работы скруббера. Поэтому выбор типа скрубберной насадки для того или иного процесса является весьма серьезной задачей. Основными требованиями, которым должна удовлетворять хорошая скрубберная насадка, являются следующие: 1) большая поверхность единицы объема, 2) большой свободный объем, 3) большое живое сечение, 4) малое сопротивление газовому потоку, 5) малый вес единицы объема насадки, 6) малое количество жидкости, задерживаемое в насадке во время работы, 7) малая засоряемость насадки механическими примесями, приносимыми с газом и жидкостью, 8) достаточная механическая прочность, 9) химическая стойкость материала насадки по отношению к действию газа и жидкости и 10) малая стоимость и простота изготовления.

Ни один тип насадки из применяемых в настоящее время в промышленности не может быть признан удовлетворяющим всем перечисленным требованиям одновременно. Выбор насадки в каждом отдельном случае требует индивидуального подхода в зависимости от характера и условий ведения процесса.

Важность первого из указанных требований вытекает из того, что скорость абсорбции при прочих равных условиях прямо пропорциональна величине поверхности насадки. При этом нужно, однако, иметь в виду, что действительной поверхностью контакта фаз является смоченная, т. е. покрытая слоем текущей жидкости поверхность. С этой точки зрения насадка с меньшей геометрической поверхностью, но обеспечивающая лучшее распределение жидкости и газа по всему сечению скруббера и хорошую смоченность поверхности, может оказаться лучшей, чем насадка с большой геометрической поверхностью, но не обеспечивающая этих

условий. Поверхность насадки обычно исчисляется в квадратных метрах на 1 кубический метр объема, занимаемого насадкой, т. е. $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Увеличение геометрической поверхности единицы объема насадки может быть достигнуто двумя путями. Первый путь — изменение геометрической формы отдельных элементов насадки при сохранении их линейных размеров. Например, поверхность единицы объема насадки из полых цилиндров всегда больше, чем из сплошных при одинаковых высоте и диаметре тех и других. Создание рифлений на поверхности, перегородок у полых тел и пр. приводит к увеличению поверхности. Этот путь увеличения поверхности единицы объема насадки связан со значительным увеличением стоимости насадки в связи с усложнением и удорожанием изготовления ее.

Второй путь — уменьшение размера отдельных элементов насадки без изменения геометрической формы. Стоимость изготовления более мелкой насадки, конечно, выше, чем крупной, но разница относительно невелика. Однако, уменьшение размеров отдельных элементов насадки связано с уменьшением свободного объема и живого сечения насадки. Это, в свою очередь, вызывает увеличение сопротивления насадки газовому потоку за счет увеличения линейной скорости газа и увеличения поверхности трения. Кроме того, с уменьшением размеров насадки уменьшаются пределы нагрузки скруббера по газу и жидкости и, следовательно, уменьшается пропускная способность скруббера. Таким образом, при выборе насадки следует соблюдать необходимое оптимальное соотношение между свободным объемом и поверхностью. Свободным объемом насадки называется объем пустого пространства между элементами насадки в м^3 на 1 м^3 полного объема, занимаемого насадкой. Обычно он выражается процентным отношением объема пустого пространства к общему объему, занятому насадкой.

Живое сечение насадки представляет собой долю общего сечения скруббера, не занятую материалом самой насадки. При беспорядочной загрузке насадки живое сечение скруббера не постоянно по высоте, но среднее живое сечение численно так же, как и живое сечение регулярно загруженной насадки, совпадает со свободным объемом. Отношение свободного объема насадки к поверхности насадки в единице объема представляет собой средний радиус свободного пространства или гидравлический радиус насадки —

$$m = \frac{V_{\text{св}}}{S},$$

где m — гидравлический радиус в м ,

$V_{\text{св}}$ — свободный объем насадки в $\text{м}^3/\text{м}^3$, численно равный живому сечению F_a в $\text{м}^2/\text{м}^2$,

S — поверхность насадки в единице объема в $\text{м}^2/\text{м}^3$, численно равная омываемому периметру S' в $\text{м}/\text{м}^2$.

Учетверенное значение гидравлического радиуса представляет собой приведенный или эквивалентный диаметр насадки

$$d_g = 4m = \frac{4 V_{св}}{S} = \frac{4 F_n}{S}.$$

Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр весьма важные величины, характеризующие гидравлические свойства насадки. Применение этих величин для обработки экспериментальных данных позволило нам установить весьма отчетливые закономерности движения газа в скрубберах с насадкой.

Для их вычисления достаточно знать: 1) количество отдельных элементов в 1 м³ объема, заполненного насадкой; 2) средний объем одного элемента насадки и 3) среднюю поверхность одного элемента насадки. Пользуясь этими данными, можно легко рассчитать свободный объем и поверхность насадки. Если элементы имеют правильную геометрическую форму, то достаточно знать линейные размеры их и количество в единице объема, чтобы рассчитать свободный объем и поверхность насадки.

В некоторых работах, например, в «Справочнике инженера-химика» Д. Перри, в книге «Основные процессы и аппараты химической технологии» А. Г. Касаткина и др. подчеркивается, что большой свободный объем или большое живое сечение обеспечивают малое сопротивление насадки газовому потоку. Это не совсем точно и может в некоторых случаях ввести читателя в заблуждение.

Как это видно из результатов наших исследований, сопротивление насадки зависит не только от свободного объема или живого сечения, но также от удельной поверхности насадки, геометрической формы насадки, способа укладки. Свободный объем регулярно загруженной насадки, как правило, всегда меньше, чем беспорядочно загруженной, однако, сопротивление последней при прочих равных условиях всегда больше. При одинаковой величине поверхности в единице объема и равных прочих условиях сопротивление хордовой насадки, имеющей меньший свободный объем, значительно меньше, чем насадки из колец Рашига. Потери механической энергии, эквивалентные сопротивлению насадки, обусловлены, во-первых, потерей напора газа за счет трения о поверхность насадки и, во-вторых, за счет увеличенной турбулентности вследствие расширения и сжатия газовой струи. Назовем потери, обусловленные первой причиной, фрикционными — ΔP_T и второй — гидродинамическими или местными — ΔP_m

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_m.$$

Увеличенная турбулентность или увеличенное поверхностное трение так или иначе стремятся сделать тоньше пленку газа и вызывают межфазовую диффузию. Опыты Кольборна¹³ и Шервуда и Джидланда¹⁴ с горячим воздухом при поверхностях нагрева различной формы показали, что потери энергии вследствие поверхностного трения более способствуют теплопередаче, чем потери вследствие повышенной турбулентности в основной массе газа.

Это в полной мере можно отнести и к процессу абсорбции. Поэтому наилучшей насадкой следует считать аэрогидродинамически обтекаемую насадку с большой поверхностью. Это подтверждается нашими опытами по абсорбции CO_2 и теплопередаче с насадкой из деревянных решеток, уложенных параллельно, в которых газ не меняет своего направления. Высокие коэффициенты абсорбции и теплопередачи обеспечиваются применением высоких скоростей газа. Насадкой, отвечающей этим условиям, является пучок вертикальных труб, орошаемых с внутренней и наружной поверхности с проходом газа как в трубах, так и в междутрубном пространстве. Междутрубное пространство должно иметь средний гидравлический радиус, соответствующим таковому внутри труб. Испытание таких насадок, проведенное Шервудом¹⁵, дало высокие коэффициенты абсорбции при очень низких потерях напора. Высокая эффективность применения такого типа насадок подтверждается также результатами работы П. А. Семенова¹⁶, которому удалось повысить коэффициенты абсорбции NH_3 водой в трубке с орошаемыми стенками в десять раз за счет применения высоких скоростей газового потока.

Весьма серьезным требованием, предъявляемым к скрубберной насадке, является малый вес единицы объема. Вес насадки влияет не только на общий вес скруббера, а стало быть, и на нагрузку фундамента, но также и на конструкцию корпуса скруббера. Беспорядочно загруженная насадка производит боковое давление на стенки скруббера и, если вес единицы объема насадки велик, то это вызывает необходимость увеличения прочности стенок скруббера и, следовательно, увеличение стоимости конструкции. Боковое давление на стенки скруббера зависит не только от веса, но и от угла естественного откоса насадки. Недоучет бокового давления насадки на стенки скруббера или башни был причиной ряда серьезных аварий в серноокислотной промышленности, связанных с разрушением башен. Регулярно загруженная насадка обычно не оказывает или оказывает небольшое боковое давление на стенки скруббера. Вся нагрузка, обусловленная весом насадки, сосредотачивается в этом случае на колосниковую решетку.

Однако, беспорядочно загруженная насадка в ряде случаев обеспечивает лучшее распределение жидкости по сечению и высоте скруббера, чем регулярно загруженная. Необходимо иметь также в виду, что недостаточная механическая прочность при большом весе насадки может привести к разрушению нижних слоев под тяжестью верхних и в связи с этим к закупориванию проходов для газа и жидкости и нарушению работы скруббера.

Малое количество жидкости, задерживаемое в насадке во время работы, желательно, потому, что при этом уменьшается вес заполнения скруббера и ускоряется выход жидкости из башни, т. е. ускоряется обновление поверхности контакта фаз. Кроме того, наличие жидкости в насадке связано с уменьшением свободного объема. С этой точки зрения также желательно, чтобы в насадке удержи-

валось по возможности небольшое количество жидкости. Однако, в некоторых специальных случаях, в частности, когда реакция между газом и жидкостью протекает медленно, наоборот, желательно, чтобы в насадке задерживалось по возможности больше жидкости. Здесь, впрочем, часто бывает более целесообразным применять колонны с тарелками.

При работе с загрязненными газами и жидкостями скрубберная насадка постепенно засоряется различными твердыми отложениями — «заиливается». При этом уменьшается свободный объем насадки, забиваются каналы для прохода газа и жидкости и нарушается работа всего скруббера.

Запыленность печного газа и плохая очистка в аппаратах Котрелля является частой причиной засорения башен Гловера в сернокислотных установках. В целях борьбы с засорением скрубберных насадок часто весьма целесообразными являются интенсивные промывки скруббера большим количеством орошающей жидкости или воды. В некоторых случаях для промывки насадки можно рекомендовать растворы или жидкости, в которых растворяются отложения. Так, например, в медно-аммиачных скрубберах, применяемых для очистки газа от окиси углерода на заводах синтетического аммиака, засорение насадки происходит за счет отложений меди на поверхности железных колец в результате реакции обменного разложения. После нескольких месяцев работы происходит обычно «закозление» насадки медными отложениями, что ухудшает работу скруббера и затрудняет перегрузку насадки. Наиболее простым и легким методом очистки насадки в данном случае является промывка скруббера аммиачной водой, в которой медь растворяется. В тех случаях, когда на орошение скруббера поступает в больших количествах вода из рек или открытых водоемов, то даже при относительно высокой степени чистоты воды происходит постепенное засорение («заиливание») насадки. Это имеет место, в частности, в скрубберах водной абсорбции CO_2 в цехах очистки конвертированного газа азотно-туковых заводов. Засорение насадки обусловлено, с одной стороны, отложением на ее поверхности различных механических примесей, имеющихся в воде, и, с другой стороны, частичным разрушением насадки скруббера из железных колец за счет коррозии CO_2 в водной среде. Засорение бывает настолько значительным, что скрубберы нуждаются в периодической чистке с перегрузкой насадки. Сроки чистки насадки скрубберов устанавливаются практикой в зависимости от местных условий и степени загрязнения применяемой для абсорбции воды. Обычно чистка производится один раз в год. Наилучшим временем для чистки скрубберов является период после весеннего половодья, во время которого вода бывает наиболее загрязнена и интенсивность засорения насадки особенно велика.

Как правило, засорение регулярно загруженной насадки имеет место в значительно меньшей степени, чем беспорядочно загруженной. С этой точки зрения в некоторых условиях, когда приходится иметь

дело с сильно загрязненными газами и жидкостями, часто целесообразно пойти на применение насадки с меньшей поверхностью, меньшим свободным объемом и пр., но гарантирующей скруббер от частых засорений.

К насадкам, мало засоряемым, относится, в частности, хордовая насадка из деревянных решеток.

Химическая стойкость материала насадки по отношению к действию соприкасающихся газа и жидкости обеспечивает долговечность и достаточную механическую прочность. Материалом для изготовления насадок служит, в зависимости от характера и агрессивности среды, железо, дерево, уголь, керамика, кварц, стекло и пр.

2. ТИПЫ СКРУББЕРНЫХ НАСАДОК

В качестве башенной насадки было предложено весьма большое количество различных материалов. Однако, по тем или иным причинам на практике находят более или менее широкое применение лишь ограниченное количество этих материалов. Они могут быть разделены на следующие группы.

Кусковой материал. В качестве кусковой насадки для заполнения скрубберов применяются: гравий, куски кварца, андезита и других каменных пород, куски кокса. Кусковая насадка обладает рядом существенных недостатков, из которых главными являются: относительно малая поверхность единицы объема, малый свободный объем и относительно большое сопротивление газовому потоку, малые пределы нагрузки скруббера по газу и жидкости. Тем не менее, благодаря доступности и дешевизне этого вида насадочного материала он до настоящего времени часто применяется в промышленности. Так, например, дробленый кварц и андезит применяются для заполнения башен Гловера и Гей-Люссака в сернокислотных установках. Кварц и андезит обладают достаточной химической стойкостью и механической прочностью. Однако, к указанным выше недостаткам кусковой насадки здесь нужно добавить еще большой вес.

Башни для получения раствора бисульфита кальция в сульфитцеллюлозном производстве заполняются дробленным известняком. В этом случае известняк не только играет роль насадки, но и вступает в химическую реакцию с раствором сернистой кислоты с образованием бисульфита кальция.

Преимущества кокса как насадки в сравнении с другими кусковыми материалами заключаются в малом весе, дешевизне и большой доступности. Этим и объясняется довольно широкое применение его в качестве насадки во многих простых и небольших по масштабу установках, где он себя оправдывает. Чаще всего насадка из кускового кокса применяется в скрубберах для охлаждения газа. Некоторые авторы относят к достоинствам кусковой коксовой насадки довольно развитую поверхность единицы объема, благодаря высо-

кой пористости кокса. Однако, по сравнению с другими видами кусковой насадки, кокс особыми преимуществами в этом отношении не отличается. Во время работы скруббера поры полностью заполняются орошающей жидкостью или покрываются сверху пленкой жидкости и, следовательно, не играют активной роли в образовании поверхности, на которой реакция взаимодействия жидкости с газовой фазой может протекать. Недостатками коксовой насадки являются малый свободный объем и живое сечение. Кроме того, вследствие недостаточной механической прочности кокс довольно быстро крошится на мелкие куски, а последние засоряют каналы для прохода газа и жидкости и тем самым нарушают нормальную работу скруббера.

Кусковая скрубберная насадка относится к категории наименее эффективных. Замена там, где это возможно, кусковой насадки более эффективной значительно интенсифицирует процесс.

В тех случаях, когда все же приходится пользоваться кусковой насадкой, необходимо обращать особое внимание на гранулометрический состав насадки. При кусках постоянной величины могут быть получены максимальные свободный объем и живое сечение насадки, а, следовательно, и минимальное сопротивление при прочих равных условиях. Наоборот, при разнородных кусках, объем свободного пространства резко падает, а потеря напора газа растет. Однородная по крупности насадка менее склонна к засорению, чем неоднородная. Правильнее одно и то же количество кускового материала рассортировать на ряд фракций и загружать отдельными слоями, чем загружать в один слой без сортировки.

Кольца Рашига. Кольца Рашига являются наиболее распространенным типом скрубберной насадки. Сравнительно со всеми другими видами насадок они обладают наилучшей комбинацией малого веса единицы объема, свободного объема, живого сечения и общей геометрической поверхности. Насадка из колец Рашига обладает значительно меньшим сопротивлением для прохода газа и допускает большие нагрузки по газу и жидкости, чем кусковая насадка. Кольцо Рашига представляет собой полый цилиндр с равными наружным диаметром и высотой. Последнее действительно и для всех других цилиндрических насадочных тел. Толщина стенок колец Рашига зависит от характера применяемого материала. Материалом для изготовления колец Рашига служат железо, алюминий, медь, стекло, керамика. Материал определяется характером среды. В последнее время в качестве кислотоупорной и щелочеупорной насадки предложены кольца из прессованного угля.

Металлические кольца имеют более тонкие стенки и соответственно больший свободный объем и большее живое сечение, чем угольные, фарфоровые, керамические.

Кольца Рашига изготавливаются размером от 8 до 120 мм. Мелкие кольца 8—15 мм применяются главным образом для заполнения насадочных ректификационных колонн. Наиболее часто применяемые размеры колец для заполнения абсорбционных аппара-

тов 25—35—50 и 80 мм. Керамические кольца размером 100 и 120 мм применяются для заполнения нижних слоев сернокислотных и азотнокислотных башен. Керамические кольца изготавливаются иногда с одной или двумя внутренними перегородками (кольца Лессинга), которые увеличивают поверхность единицы объема без значительного понижения свободного объема.

Кольца небольших размеров до 50 мм включительно (в отдельных случаях и до 80 мм) загружаются в скруббер засыпкой в беспорядке. Кольца больших размеров от 80 и выше обычно укладываются в башне правильными рядами в шахматном порядке.

В настоящее время за границей имеются специальные машины для изготовления керамических колец с внутренней одной или двумя спиральными лопастями, которые образуют винтовые ходы для газа и жидкости. Такая насадка загружается всегда путем укладки правильными рядами. Внутренние спирали увеличивают поверхность и обеспечивают лучший контакт между газом и жидкостью без большого уменьшения свободного объема и живого сечения. Однако, высокая стоимость изготовления колец со спиральными лопастями и работы по укладке их в башню ограничивает их применение. Они применяются лишь в редких специальных случаях.

Седлообразная насадка Берля. В Западной Европе и США в последние годы наряду с керамическими кольцами Рашига находит широкое применение керамическая седлообразная насадка Берля. Насадка Берля при тех же линейных размерах элемента, что и у колец Рашига, обладает примерно на 25% большей поверхностью и несколько большим свободным объемом. В смысле простоты изготовления и стоимости насадка Берля не уступает кольцам Рашига. Элементы Берля седлообразной формы штампуются из глины с помощью специальных машин. Габаритные размеры элемента делаются одинаковыми во всех трех измерениях (длине, ширине и высоте).

Шахматная насадка. Шахматная насадка представляет собой заполнение из обычных прямоугольных кирпичей, поставленных на ребро. Такая насадка обладает большим весом, малой поверхностью единицы объема и малым свободным объемом. Свободный объем и поверхность могут быть увеличены применением вместо стандартных кирпичей специальных тонких плиток с ребристой поверхностью, однако, при этом уже теряются преимущества простоты и относительной дешевизны кирпичной насадки. Несмотря на свои недостатки, кирпичная насадка в некоторых случаях может быть значительно более эффективной, чем беспорядочно загруженный кусковой материал. Благодаря прямолинейным каналам для газа, сопротивление шахматной насадки составляет небольшую величину. Шахматная насадка частично применяется для заполнения сернокислотных башен. В качестве элементов насадки служат кислотоупорные параллелепипеды, называемые в технике — стабиль-формат.

Хордовая насадка представляет собой обычно накрест уложенные деревянные решетки и относится к довольно распространенному виду насадки. Отдельные решетки собираются из 10—15 поставленных на ребро досок толщиной от 10 до 20 мм и высотой 100—150 мм, соединенных металлическими или деревянными связями. Решетки делаются в форме сегментов круга с тем, чтобы после загрузки и сборки сегментов внутри скруббера, отдельные ряды решеток имели круглое сечение, соответствующее сечению скруббера.

Промежутки между досками-элементами решетки служат каналами для прохода газа, а сами доски — направляющими. Для лучшего перемешивания газа при движении через насадку отдельные ряды решеток укладываются крест на крест. К недостаткам хордовой насадки следует отнести относительно невысокую поверхность в единице объема и сравнительно небольшой свободный объем и живое сечение. К достоинствам — малое сопротивление газовому потоку, простоту и дешевизну изготовления, большую пропускную способность по газу и жидкости, малую склонность к засорению. Так как в хордовой насадке работает боковая вертикальная поверхность досок, то во время работы на ней задерживается небольшое количество жидкости и происходит быстрое обновление поверхности контакта фаз. Хордовая насадка довольно широко применяется в промышленности для заполнения скрубберов, особенно в тех случаях, когда по условиям технологической схемы процесса не допустимы большие потери напора газа. В частности, она применяется для заполнения бензольных и аммиачных скрубберов коксо-химических заводов, сатурационных, водонагревательных и конденсационных башен, установок по получению водорода из водяного газа конверсионным методом и пр. Как будет показано ниже, хордовая насадка по своим гидродинамическим свойствам относится к категории наиболее эффективных насадок и ее применение в промышленности могло бы быть еще более широким.

Фасонная насадка сложной геометрической формы. В последние годы предложено большое количество насадок сложной геометрической формы. Основным руководящим принципом при разработке новых типов насадки является увеличение поверхности в единице объема, свободного объема и живого сечения, а также улучшение контакта между фазами путем придания отдельным элементам аэрогидродинамически обтекаемой формы.

К таким насадкам, в частности, относятся: кольца с внутренними спиральными лопастями, керамические пропеллеры Нильсена, ячейки Гутмана, шестигранная спиральная насадка, элементы Гекенблейкнера, рифленные кольца Рашига, треугольная насадка Прим, полые шары Гутмана и др.

Каждая из указанных насадок обладает рядом преимуществ и недостатков в сравнении с другими. Некоторые из них, в частности, не оправдывают тех надежд, которые возлагали на них их изобретатели. Так, например, шары Гутмана, представляющие собой

полые керамические шары с несколькими отверстиями, оказались весьма не эффективными, так как внутренняя поверхность этих шаров не активна, потому что газ и жидкость внутри шаров практически бывают неподвижны.

Общим недостатком всех фасонных насадок сложной геометрической формы является значительно большая стоимость их в сравнении с более простыми (кусковой материал, кирпич, кольца Рашига и пр.). Однако, в некоторых специальных случаях выгоды применения того или иного типа насадки оправдывают их высокую стоимость. Следует отметить, что фасонные насадки сложной геометрической формы не являются еще массовыми и находят пока весьма ограниченное применение.

Описание и характеристика различных скрубберных насадок, включая некоторые типы сложных фасонных насадок, даны в работе А. Файрли ¹⁷.

В некоторых случаях, в частности, для заполнения насадочных ректификационных колонн для разгонки нефтяных дистиллятов в качестве насадки применяются металлические однокольчатые и двухкольчатые цепочки, проволоочные спирали, проволоочные квадраты, гвозди, заклепки, стеклянные трубки и пр. Исследованию и описанию свойств указанных типов насадок посвящена работа М. Фенске, С. Тонгберга и Д. Куингли ¹⁸.

Таблица 1

Характеристика колец Рашига

Материал	Размеры в мм	Количество в м ³	Вес в кг/м ³	Поверх- ность в м ² /м ³
Черная жель	8×8×0,3	1 500 000	750	630
» »	10×10×0,5	770 000	960	500
» »	12×12×0,5	450 000	810	430
» »	15×15×0,25	240 000	330	350
» »	15×15×0,5	240 000	660	350
» »	25×25×0,3	55 000	240	220
» »	25×25×0,8	55 000	640	220
» »	35×35×1	19 000	570	150
» »	50×50×1	7 000	430	110
Фарфор	8×8×1	1 360 000	600	540
»	10×10×1,5	700 000	700	440
»	12×12×1,5	410 000	610	380
»	15×15×2	220 000	670	310
»	25×25×3	50 000	630	200
»	35×35×4	18 000	610	140
»	50×50×5	6 000	530	100
Керамика	10×10×1,5	700 000	700	440
»	15×15×2	220 000	670	310
»	25×25×3	50 000	630	200
»	35×35×4	18 000	610	140
»	50×50×5	6 000	530	100

Физические характеристики различных насадочных материалов для скрубберов приведены в статьях К. М. Малина¹⁹ и монографиях Вебба²⁰, Т. Шервуда¹⁵, Е. Берля²¹, Д. Эйкена и М. Джакоб²², а также в упомянутых выше книгах Д. Перри, А. Г. Касаткина, Б. Беджера и Мак-Кэба.

Однако, приводимые отдельными авторами сведения, зачастую не отличаются достаточной полнотой. Так, например, в некоторых случаях характеристика насадки не включает в себя сведений о количестве отдельных элементов в единице объема, толщине стенок кольцевой насадки, свободном объеме, весе и пр. Иногда сведения об одних и тех же насадках разноречивы. Поэтому многие литературные данные, касающиеся характеристики отдельных скрубберных насадок, нуждаются в проверке и дополнении. Достаточно надежная характеристика насадки из колец Рашига, составленная на основе данных фирмы Рашиг, приведена в табл. 1 (см. стр. 32).

3. ТИПЫ НАСАДОК, ПРИНЯТЫЕ В ДАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ, И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Исходя из задач, поставленных в данной работе в качестве объекта исследования, нами были приняты три типа наиболее употребительных скрубберных насадок: кольца Рашига, кусковой материал и хордовая насадка.

Кольца Рашига. В опытах применялись стандартные керамические кольца Рашига, изготавливаемые Щекинским заводом, размером 15×15 мм, 25×25 мм, 35×35 мм и 50×50 мм и железные кольца размером 50×50 мм. Последние были изготовлены из кровельного листового железа толщиной 0,5 мм.

Линейные размеры (высота, диаметр и толщина стенки) всех колец определялись путем тщательного измерения не менее 100 штук каждой партии. Установленные таким путем средние линейные размеры колец приведены в скобках, в табл. 2 и 3. На основе средних линейных размеров вычислялись средний объем и средняя поверхность одного кольца. Умножением этих величин на количество колец подсчитывался объем, занимаемый материалом самих колец, и общая поверхность колец в 1 м³. По разности между общим объемом и объемом, занимаемым материалом колец, вычислялся свободный объем. Количество колец в единице объема определялось путем прямого подсчета при заполнении цилиндрического сосуда с диаметром 300 мм, емкостью 31 л. Кроме того, подсчет количества колец производился в каждом случае при заполнении опытного скруббера. Для проверки вычисленных значений свободного объема колец проводились прямые измерения свободного объема путем заполнения пустот между кольцами измеренным количеством воды. Для того, чтобы исключить влияние на результат измерения впитывания воды порами керамических колец, кольца предварительно увлажнялись.

В процессе проведения измерений, а также при обработке ре-

З. Н. М. Жаворонков

зультатов исследования выяснилось, что физические константы, характеризующие насадку, зависят от диаметра сосуда, в котором производятся измерения, или точнее, от отношения диаметра элементов насадки (отдельных колец) к диаметру скруббера — $\frac{d}{D}$.

В скрубберах малого диаметра при заполнении их насадкой относительно крупного размера стенка самого скруббера оказывает влияние на характер распределения насадки, способствуя образованию дополнительных пустот в насадке, в особенности непосредственно у стенок. При этом оказалось, что при заполнении одной и той же насадкой двух скрубберов с разным диаметром, как и следовало ожидать, в скруббере с меньшим диаметром вмещается в единицу объема меньшее количество элементов насадки. Поэтому свободный объем в данном случае получается большим, а удельная поверхность насадки меньшей. Это весьма важное обстоятельство не учитывалось некоторыми предшествующими авторами и было причиной значительных неточностей и несовпадения результатов, полученных различными исследователями.

Нами было проведено измерение количества колец в единицу объема в 7 различных цилиндрических сосудах разного диаметра (от 65 до 440 мм). Измерение было выполнено для колец 4 размеров (15, 25, 35 и 50 мм). Результаты измерения представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что с уменьшением отношения $\frac{d}{D}$ количество колец в единицу объема возрастает. Графически количество колец в 1 м³ объема, как функция $\frac{d}{D}$, отношения диаметра кольца к диаметру скруббера, представлено на рис. 1. Из таблицы и графика

№ п/п.	Размеры цилиндра в мм	Объем цилиндра в л	Кольца 15×15×2 мм (14,5×14,5×2,25)					Кольца	
			Количество колец в цилиндре	Количество колец в 1 м ³	Свободный объем м ³ /м ³ , $\nu_{св}$	Поверхность м ² /м ³ , S	$\frac{d}{D}$	Количество колец в цилиндре	Количество колец в 1 м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$D=65; h=400$	1,326	275	207550	0,75	274	0,223	—	—
2	$D=88; h=160$	0,85	193	227000	0,727	300	0,165	—	—
3	$D=120; h=230$	2,5	605	242000	0,71	306	0,121	114	45500
4	$D=210; h=255$	8,6	2120	250000	0,70	330	0,069	447	52000
5	$D=225; h=310$	12,55	3120	250000	0,70	330	0,0645	660	52500
6	$D=300; h=440$	31,0	7750	250000	0,70	330	0,0485	1650	53200
7	$D=440; h=690$	104	26000	250000	0,70	330	0,033	5550	53200

видно, что вне зависимости от размера колец при значении $\frac{d}{D}$, равном $-0,09$ и ниже, количество колец в единице объема становится постоянным, т. е. стенки скруббера перестают оказывать влияние на распределение насадки в скруббере.

Точки пересечения кривых с ординатой соответствуют количеству колец в 1 м^3 объема при загрузке их в скруббер с бесконечно большим диаметром.

Если принять количество колец в 1 м^3 объема при бесконечно большом диаметре, т. е. при $\frac{d}{D}=0$, за единицу, а количество колец при других значениях $\frac{d}{D}$ выразить в виде процентных долей, то точки для различных колец укладываются на одну кривую, которая и представлена на рис. 2.

С помощью этой кривой можно определить количество колец в 1 м^3 объема для любых значений $\frac{d}{D}$, если оно известно для какого-то одного определенного значения $\frac{d}{D}$. Кривая показывает, что для исключения влияния стенок скруббера, экспериментальные определения количества колец в 1 м^3 необходимо проводить при условии $\frac{d}{D} < -0,09$.

Так как свободный объем и удельная поверхность насадки являются функцией количества элементов в единице объема, то и они при значении $\frac{d}{D} < -0,09$ становятся стабильными.

Таблица 2

25×25×3 мм (24×26×3)			Кольца 35×35×4 мм (33×33×3,5)					Кольца 50×50×5 мм (49×48×5,5)				
Свободный объем $\text{м}^3/\text{м}^3, \nu_{\text{св}}$	Поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3, S$	$\frac{d}{D}$	Количество ко- лец в цилиндре	Количество ко- лец в 1 м^3	Свободный объем в $\text{м}^3/\text{м}^3, \nu_{\text{св}}$	Поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3, S$	$\frac{d}{D}$	Количество ко- лец в цилиндре	Количество ко- лец в 1 м^3	Свободный объем $\text{м}^3/\text{м}^3, \nu_{\text{св}}$	Поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3, S$	$\frac{d}{D}$
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,777	175	0,208	42	16300	0,82	117	0,275	—	—	—	—	—
0,745	200	0,119	165	19200	0,79	133	0,157	45	5250	0,812	76,5	0,233
9,743	202	0,111	244	19500	0,785	183	0,146	—	—	—	—	—
0,74	204	0,0835	625	20200	0,73	140	0,11	185	6000	0,785	87,5	0,162
0,74	204	0,0570	2160	20700	0,775	148	0,075	670	6420	0,77	94	0,110

Очевидно, что эти выводы действительны для беспорядочно загруженной насадки, состоящей из элементов любой геометрии,

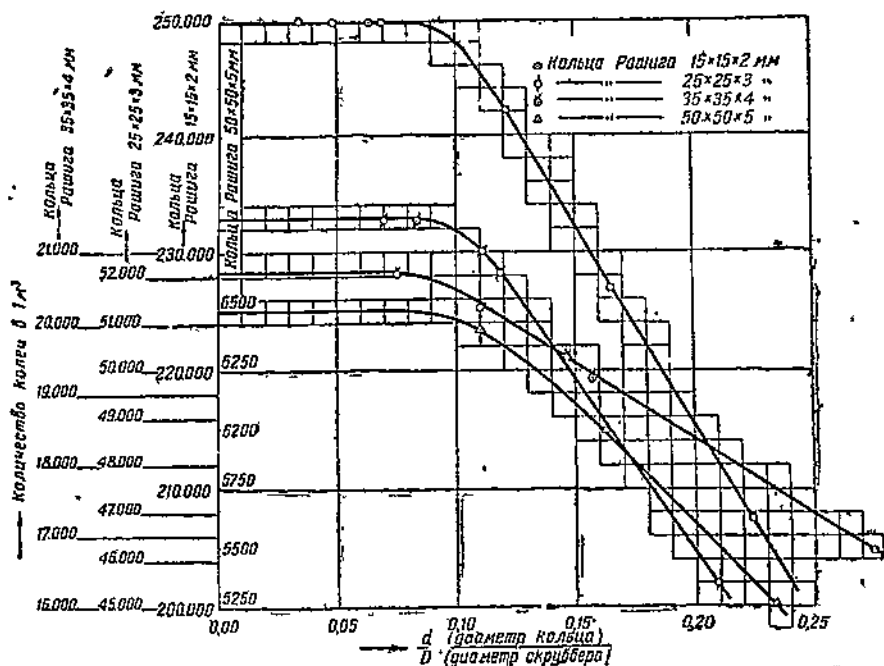


Рис. 1. Количество колец Рашига в 1 м³ объема скруббера как функция $\frac{d}{D}$.

ческой формы при условии, что линейные габариты элементов во всех трех измерениях приблизительно одинаковы. Зависимость свободного объема скрубберной насадки из керамических колец Рашига от $\frac{d}{D}$ графически представлена на рис. 3.

Результирующие данные по характеристике скрубберных насадок из колец Рашига приведены в табл. 3.

Свободный объем и поверхность колец в этой таблице указаны для скруббера с диаметром 305 мм. Эти данные действительны для скруббера любого большего диаметра, ибо отношение $\frac{d}{D}$ для всех колец, кроме 50 мм, не превышает 0,09. Для определения количества колец в 1 м³, свободного объема и поверхности 50 мм колец для скруббера большего диаметра в цифры табл. 3 необходимо внести поправку с помощью кривой рис. 2.

На рис. 4. представлена в графической форме зависимость количества керамических (толстостенных) колец Рашига в 1 м³ объема

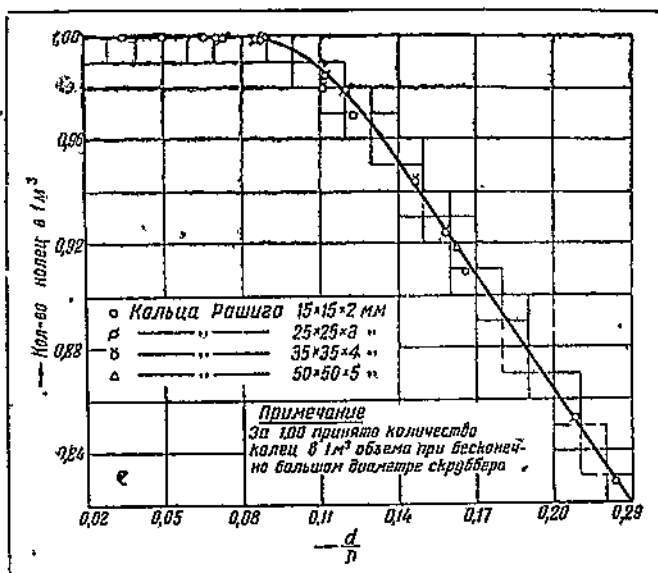


Рис. 2. Относительное изменение количества колец в 1 м³ объема scrubбера в зависимости от $\frac{d}{D}$.

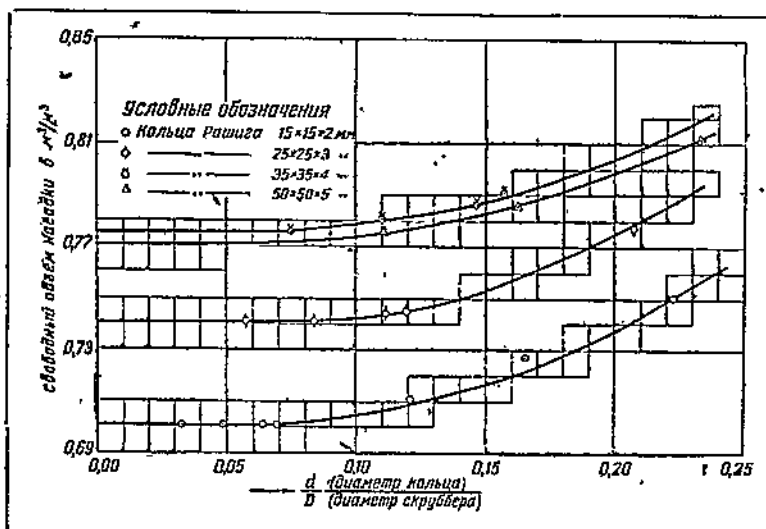


Рис. 3. Свободный объем scrubберной насадки из керамических колец Рашига, как функция $\frac{d}{D}$.

насадки от диаметра кольца при беспорядочной их засыпке в скруббер. На графике кружками обозначены наши данные, а перечеркнутыми кружками —

данные табл. 1 для керамических и фарфоровых колец.

Прямая на графике в логарифмических координатах (рис. 4) удовлетворяет уравнению:

$$N = \frac{0,75 \cdot 10^6}{d^3},$$

где N — количество колец в 1 м³ объема насадки при беспорядочной загрузке;

d — диаметр кольца в см.

С помощью этого уравнения можно вычислить количество керамических колец Рашига в 1 м³ объема насадки для колец любого диаметра при беспорядочной их засыпке в скруббер. Уравнение действительно для условий, когда влияние стенок на распределение колец в скруббере или отсутствует, или сведено к минимуму, т. е. при $\frac{d}{D} < 0,09$.

Уравнением можно воспользоваться и для вычисления количества тонкостенных железных колец в 1 м³ объема. В последнем

Рис. 4. Количество колец в 1 м³ объема скруббера, как функция диаметра колец (d).

случае необходимо полученный результат увеличить на 10%, так как сопоставление данных табл. 1 по керамическим кольцам и железным показывает, что в последнем случае для всех колец результат получается на 10% больше.

Вес насадки из колец Рашига различного диаметра установлен путем взвешивания отдельных партий из нескольких сот штук колец и путем определения таким образом среднего веса одного кольца.

На рис. 5 дан внешний вид некоторых кольцевых (керамических) и кусковых (андезит и кокс) насадок. На рис. 6 показан вид сверху на загрузку железных колец в скруббер.

Насадка из кускового материала. В качестве кускового насадочного материала в опытах были применены куски андезита, куски кокса четырех размеров и аммиачный катализатор. Во всех случаях куски имели неправильную форму. Аммиачный катализатор был

взят готовым с одного из азотно-туковых заводов. Андезитовая и коксовая насадки были изготовлены путем измельчения и тщательной классификации вручную на фракции с одинаковыми размерами кусков. Определение размеров отдельных элементов

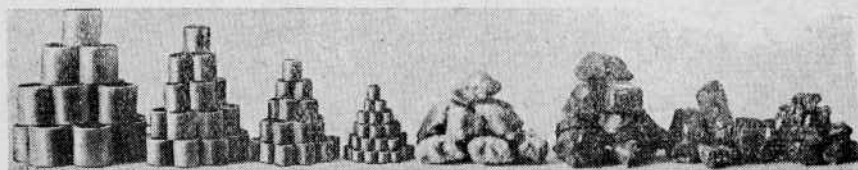


Рис. 5. Скруберная насадка из керамических колец Рашига и кускового материала (андезит, кокс).

насадки (кусков) производилось путем измерения трех ребер отдельного куска. Для каждого сорта насадки был произведен промер 25 кусков и затем вычислен средний размер. Куски для промера отбирались от данной партии с соблюдением правил отбора средней пробы. Средний размер кусочков аммиачного катализатора был определен путем промера 300 штук отдельных кусочков. Результаты промера указаны в табл. 3, в которой приведены средние арифметические значения размера ребра отдельных видов кусковой насадки. В скобках указаны средние значения наибольшего, среднего и наименьшего размера ребра для данного вида кусковой насадки. Количество элементов (кусков) в единице объема и вес насадки определялись так же, как и для колец Рашига. Свободный объем кусковой насадки определялся путем заполнения пустот между кусками измеренным количеством воды. Кокс при этом предварительно увлажнялся с тем, чтобы исключить ошибку измерения за счет впитывания воды порами кокса. Средний объем отдельного куска находился делением объема, занимаемого самими кусками, на количество кусков в единице объема.

Для вычисления поверхности очерчивались на миллиметровой бумаге все грани 25 кусков каждой насадки и с помощью планиметра определялась общая поверхность. По этим данным вычислялась средняя поверхность куска и затем поверхность насадки в 1 м^3 объема.

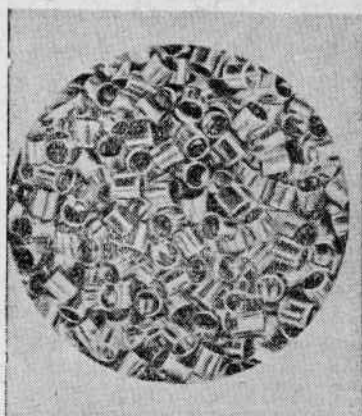


Рис. 6. Насадка из железных колец, загруженных в *скруббер в беспорядке (вид сверху).

Таблица 3

Характеристика скрубберных насадок из колец Рашига и кускового материала

№ п/п	Вид насадки	Размеры элемента насадки в мм	Количество элементов в 1 м ² поверхности	Средняя площадь поверхности одного элемента в м ²	Площадь поверхности в м ²	Вес в кг	Техническое описание	Средняя плотность в кг/м ³	Средняя площадь поверхности одного элемента в м ²	Средняя плотность в кг/м ³	Средняя площадь поверхности одного элемента в м ²	Средняя плотность в кг/м ³	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	Кольца Рашига — фарфор	8×8×1,5	1 465 000	0,64	570	600	0,001 120	0,001 100	0,2455	3,884	0,41	По данным каталога Е. Пайрета и др.	
2	Кольца Рашига — керамика	15×15×2 (14,5×14,5×2,25)	250 000	0,700	330	690	0,002 12	0,002 04	1,2	13,2	2,75		
3	То же	25×25×3 (24×26×3)	53 200	0,74	204	532	0,003 63	0,003 4	4,9	38,4	10,0		
4	То же	35×35×4 (33×33×3,5)	20 200	0,78	140	505	0,005 55	0,005 10	10,7	69,5	24,5		
5	То же	50×50×5 (49×48×5,5)	6 000	0,785	87,5	530	0,009 00	0,007 80	36,0	146,0	88,0		
6	Кольца Рашига — железные	35×35×2,5	19 000	0,83	147	—	0,009 93	—	8,92	77,2	28,9		
7	То же	50×50×0,5	6 500	0,970	104	240	0,009 3	0,008 25	4,75	160,0	37	По данным каталога Е. Пайрета и др.	
8	Гравит крутлый	42 (56,8×40,8×29)	14 400	0,388	80,5	—	0,004 85	0,004 55	42,5	56	—		
9	Аллезит кусковой	43,2 (54×43,7×32,6)	12 600	0,565	68	1200	0,008 32	0,007 0	34,5	54	95,5		
10	Кокс кусковой	42,6 (52×40,3×35,5)	14 000	0,560	77	455	0,007 30	0,006 25	32,6	55	32,5		
11	То же	40,8 (47,6×41,5×33,4)	15 250	0,545	86	585	0,006 33	0,005 5	29,8	56	38,5		
12	То же	28,6 (35,6×28,8×21,2)	27 700	0,535	110	660	0,004 85	0,004 35	16,8	40	23,8		
13	То же	24,4 (29,6×25,8×18)	64 800	0,532	120	600	0,004 55	0,004 00	7,2	18,6	9,30	По данным каталога Е. Пайрета и др.	
14	Катализатор синтеза аммиака в кусочках	6,1 (8,25×6,25×3,8)	5 200 000	0,465	960	2420	0,000 485	0,000 478	0,103	1,85	0,465		
15	Катализатор конверсии СО в таблетках	d—11,5; h—6 (5—7)	1 085 000	0,38	460	1100	0,000 825	0,000 81	0,57	4,25	1,02		
16	Катализатор сернистого (ванадиевого) в таблетках	d—11; h—6,5	1 000 000	0,43	415	614	0,001 035	0,001 002	0,57	4,15	0,614		

* Поверхность стенок скруббера при диаметре последнего $D = 305$ мм составляет $13,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

При вычислении средней поверхности кусочка аммиачного катализатора исходили из суммарной измеренной поверхности 300 отдельных кусочков. Измерение поверхности аммиачного катализатора осуществлялось следующим образом: отдельные кусочки опускались в раствор красителя, затем с помощью пинцета вынимались и завертывались в миллиметровую бумагу; бумага обжималась по всем граням кусочка так плотно, чтобы на миллиметровке получился четкий отпечаток; после высыхания бумага разворачивалась и планиметрированием отпечатков граней определялась поверхность отдельного кусочка.

Результирующие данные по физическим константам, характерным для вышеуказанных кусковых насадок различного диаметра, приведены в табл. 3. Там же даны по результатам наших определений физические константы для катализаторов конверсии окиси углерода и окисления сернистого газа. Эти катализаторы применяются в виде прессованных таблеток, имеющих форму цилиндра с диаметром 11—11,5 мм и высотой 6—7 мм. Так как под влиянием воды таблетки и того и другого катализатора разрушаются при определении свободного объема, вместо воды был применен мелкий кварцевый песок. В остальном методика определения физических констант катализаторов была та же, что и для кольцевых и кусковых насадок.

При рассмотрении данных табл. 3 бросается в глаза то, что свободный объем кусковой насадки мало зависит от размера кусков. Кроме того, уменьшение размера отдельных элементов кусковой насадки не приводит к значительному увеличению поверхности насадки, как это имеет место, например, в насадке из колец Рашига. Если при этом учесть, что относительная потеря поверхности в местах контакта отдельных кусков будет больше в случае более мелкой насадки, то увеличение поверхности за счет уменьшения размеров отдельных кусков будет еще меньше.

Таблетки катализаторов конверсии окиси углерода и окисления сернистого газа имеют одинаковый размер. Но количество таблеток в единице объема, свободный объем и поверхность, как это видно из табл. 3, не одинаковы. Объясняется это различием в насыпном весе катализаторов. Катализатор конверсии окиси углерода, как более тяжелый, укладывается при засыпке более плотно, с большим количеством таблеток в единице объема и несколько меньшим свободным объемом, чем катализатор окисления сернистого газа.

Насадка из деревянных решеток (хордовая насадка). В качестве хордовой насадки в наших опытах применялись деревянные решетки 4 типов. Решетки имели круглое сечение (средний диаметр 285 мм) и состояли из деревянных досок толщиной 10 мм, поставленных на ребро и связанных деревянными стержнями. Конструкция и внешний вид решеток показаны на рис. 7.

Решетки № 1 состояли из 15 досок — планок высотой 100 мм с расстоянием между досками 10 мм. Решетки № 2 состояли также из 15 досок и с тем же расстоянием между досками, но высота решетки

Характеристика хордовой

№ п/п.	Вид насадки	Размеры	Свободный	Поверхность в	Вес в кг/м³
			объем м³/м², $v_{св}$	м²/м³ S	
1	Решетки № 1 из деревянных досок. Загрузка накрест	Высота 100 мм, толщина доски 100 мм, расстояние между досками 10 мм	0,550	100	210
2	Решетки № 1 из деревянных досок. Загрузка параллельно	То же	0,550	100	210
3	Решетки № 2 из деревянных досок. Загрузка накрест	Высота 50 мм, толщина доски 100 мм, расстояние между досками 10 мм	0,550	100	210
4	Решетки № 2 из деревянных досок. Загрузка параллельно	То же	0,550	100	210
5	Решетки № 3 из деревянных досок. Загрузка накрест	Высота 100 мм, толщина доски 10 мм, расстояние между досками 20 мм	0,68	65,5	145
6	Решетки № 3 из деревянных досок. Загрузка параллельно	То же	0,68	65,5	145
7	Решетки № 4 из деревянных досок. Загрузка накрест	Высота 100 мм, толщина доски 10 мм, расстояние между досками 30 мм	0,77	48,5	110
8	Решетки № 4 из деревянных досок. Загрузка параллельно	То же	0,77	48,5	110
9	Кольца Рашига керамические. Укладка трубчатой	50×50×5 мм (49×48×5,5)	0,735	108	650
10	Кольца Рашига керамические. Укладка в шахматном порядке	В 1 м³ 7400 штук	0,735	108	650

¹) В опытах применялась насадка в виде решеток круглого сечения с ди № 2—15 шт.; № 3—10 шт.; № 4—8 шт.

²) Поверхность стенок скруббера равна 13,1 м² на 1 м³ (при диаметре

³) В скобках указан оmyаемый периметр с учетом стенок скруббера.

Таблица 4

насадки для скрубберов ¹⁾

Гидравлический радиус $m = \frac{v_{ca}}{S}$	Гидравлический радиус с учетом поверхности стенок скруббера ²⁾	Средний объем одной решетки в cm^3	Средняя поверхность одной решетки в cm^2	Живое сечение скруббера в m^2/m^2		Омываемый периметр ³⁾ в m/m^2	Количество пересечений на 1 м высоты насадки
				В каналах решетки	В местах пересечения (контакты)		
0,0055	0,00487	3350	7500	0,54	0,312	100 (113,1)	10
0,0055	0,00487	3350	7500	0,54	—	100 (113,1)	—
0,0055	0,00487	1675	3750	0,54	0,312	100 (113,1)	20
0,0055	0,00487	1675	3750	0,54	—	100 (113,1)	—
0,0104	0,00865	2450	5000	0,695	0,55	64,7 (77,8)	10
0,0104	0,00865	2450	5000	0,695	—	64,7 (77,8)	—
0,0158	0,0125	1700	3600	0,77	0,655	49,3 (62,4)	10
0,0158	0,0125	1700	3600	0,77	—	49,3 (62,4)	—
0,00680	0,00605	36,0	146	0,72	—	102 (115,1)	—
0,00680	0,00605	36,0	146	0,72	0,495	102 (115,1)	20

аметром 285 мм. Количество элементов досок в решетках было: № 1—15 шт. скруббера 305 мм).

была 50 мм. Решетки № 3 состояли из 10 досок высотой 100 мм с расстоянием между досками 20 мм. Решетки № 4 состояли из 8 досок высотой 100 мм с расстоянием между досками 30 мм.

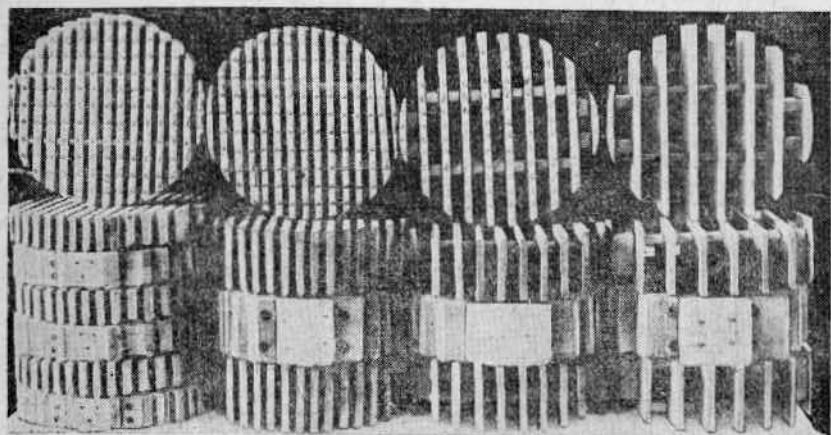


Рис. 7. Решетчатая (хордовая) скрубберная насадка.

Для обеспечения лучшего орошения при стекании орошающей жидкости с одной решетки на другую нижняя часть досок всех решеток делалась зазубренной формы. При отсутствии зазубрин орошающая жидкость, в случае малейшего перекоса решетки, стекает к стенке скруббера; гладкие поверхности досок служат в данном случае направляющими.

Результирующие данные по характеристике хордовой насадки, примененной в наших опытах, приведены в табл. 4.

В этой же таблице приведены данные, характеризующие насадку из керамических колец Рашига размером $50 \times 50 \times 5$ мм при регулярной укладке их в скруббер трубчаткой и в шахматном порядке.

Г Л А В А III

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СКРУББЕРНЫХ НАСАДОК, ПРЕДЕЛЫ НАГРУЗКИ СКРУББЕРОВ ПО ГАЗУ И ЖИДКОСТИ («ЗАХЛЕБЫВАНИЕ») И КОЛИЧЕСТВО ЖИДКОСТИ, УДЕРЖИВАЕМОЕ НАСАДКОЙ

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Гидравлическое сопротивление скрубберных насадок и пористых материалов

Впервые измерение потерь напора газа при прохождении его через скрубберную насадку было предпринято Цейсбергом²³ в 1919 году. Исследование проводилось в опытной башне диаметром 760 мм и высотой 4,6 м. В опытах непосредственно фиксировалась потеря напора воздуха, протягиваемого через заполненную насадкой башню. Опыты производились в изотермических условиях при температуре поступающего воздуха 15°C. Цейсбергом было измерено сопротивление некоторых типов скрубберных насадок как сухих, так и смоченных или орошаемых небольшим количеством жидкости (вода и 92%-ная серная кислота). Плотность орошения в опытах Цейсберга не превышала 3,2 м³/час на 1 м² общего сечения скруббера. На основе полученных экспериментальных данных им предложено следующее уравнение для вычисления потерь напора газа:

$$\Delta P = \zeta H w^2 \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

где ΔP — потеря напора газа в кг/м² или мм водяного столба;

ζ — коэффициент сопротивления, представляющий собой потерю напора газа в мм в. с. на 1 м высоты слоя насадки;

H — высота слоя насадки в м;

w — скорость газа, в м/мин., считая на общее сечение пустого скруббера.

Коэффициенты сопротивления для некоторых типов насадок (кокс, кварц, кольца, черепица, уложенная в шахматном порядке и др.), полученные Цейсбергом, часто встречаются в литературе (Касаткин, Перри, Шервуд). Однако, работа Цейсберга имеет ряд дефектов,

ограничивающих возможность использования полученных им данных при проектировании.

Прежде всего, работа охватывает сравнительно небольшое количество типов и размеров скрубберных насадок. Кроме того, количество определений, выполненных для каждого из исследованных типов насадок, явно недостаточно.

В работе не описана методика проведения опытов и обработки результатов измерений и не указаны пределы скоростей газа, в которых проводились измерения.

Формула для подсчета сопротивления насадок, предложенная Цейсбергом, действительна только для воздуха и не учитывает влияния на потерю напора физических свойств самого газа (плотность, вязкость).

При обработке своих данных с помощью уравнения (1) Цейсберг исходит из квадратичного закона сопротивления, тогда как последующими исследованиями, в том числе и нашими, установлено, что при скоростях газа, соответствующих условиям работы промышленных скрубберов для сухих и мало орошаемых насадок, сопротивление пропорционально скорости в степени, меньшей 2.

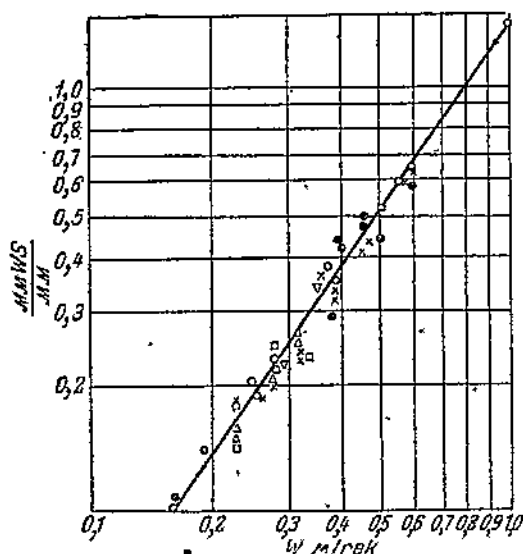


Рис. 8. Сопротивление слоя пшеницы, как функция скорости воздуха (по данным Л. К. Рамзина).

погрешностей в данных Цейсберга, явившихся, повидимому, результатом какого-либо органического дефекта методики проведения опытов.

Однако, отсутствие более надежных данных по сопротивлению скрубберных насадок заставляло до самого последнего времени при проектировании пользоваться результатами работы Цейсберга.

Результаты, полученные Цейсбергом, не дают возможности установить какие-либо закономерности, как вследствие малочисленности результатов экспериментальных данных, так и вследствие большого несоответствия их в опытах, проведенных в более или менее одинаковых условиях.

Данные Цейсберга по ряду насадок резко не согласуются с результатами более поздних исследований других авторов, являясь сильно завышенными, причем в некоторых случаях наблюдается расхождение в 3—4 раза.

Все это заставляет предполагать наличие крупных

Следует указать также, что в русских переводах книг Беджера и Мак-Кэба и Перри так же, как и в первых изданиях их на английском языке, в уравнении Цейсберга скорость газа указана не в м/мин. , а в м/сек. Это приводит к 3600-кратной ошибке при вычислении падения напора газа.

В 1926—28 гг. были опубликованы работы Л. К. Рамзина²⁴ (Всесоюзный теплотехнический институт), посвященные определению сопротивления различных сухих сыпучих материалов, как-то: антрацитовый мелочи, пшеницы, кукурузы и пр. Работы преследовали цель получить необходимые данные для проектирования сушилок и имеют некоторое, хотя и косвенное отношение к изучаемым нами вопросам. Данные Рамзина по сопротивлению слоя пшеницы графически представлены на рис. 8. Для вычисления сопротивления сыпучих материалов была предложена формула:

$$\Delta P = a H w^n, \quad (2)$$

где a и n — эмпирические константы, являющиеся функцией среднего диаметра зерна.

Числовые значения a и n при работе с воздухом удельного веса $\gamma=1,17$ для сыпучих материалов с различным диаметром зерна приведены в нижеследующей таблице:

Т а б л и ц а 5

d мм	1	2	4	6	10	15	20
n	1,35	1,37	1,44	1,51	1,64	1,76	1,85
a	4200	2400	1330	820	330	150	100

Далее была сделана попытка²⁵ теоретически истолковать зависимость потери напора ΔP в уравнении (2) от диаметра зерен d и скорости газа w ; условно было принято, что общая потеря напора ΔP состоит из двух слагаемых, в одно из которых входит сомножителем $\frac{w^2}{d}$ и в другое $\frac{w}{d^2}$. С уменьшением w и d показатель степени n в уравнении (2) стремится к единице, при увеличении w и d — к двум.

Хотя результаты работы Л. К. Рамзина и могут быть применены для расчета сопротивления слоя мелких зернистых материалов, однако, область их применения ограничивается сравнительно узкими пределами, в которых проводились опыты. Общей закономерности движения газов в трубах с заполнением зернистым материалом работы Рамзина не устанавливают.

В 1922 г. Блейк²⁶ провел опыты в небольшой стеклянной колонне по определению сопротивления сухой дробленой пемзы и стеклянных колец диаметром 6—12 мм. Блейк первый сделал попытку применить для обработки своих экспериментальных данных теорию размерности и получил уравнение для расчета сопротивления, аналогичное уравнению для течения в трубах:

$$\frac{\Delta P d}{\gamma G^2} = \varphi \left(\frac{G d}{\mu} \right), \quad (3)$$

где ΔP — потеря напора;

ρ — плотность газа;

d — средний диаметр частиц насадки;

l — высота слоя насадки;

G — весовая скорость газа и

μ — вязкость газа.

Здесь комплекс $\frac{Gd}{\mu}$ представляет собой модифицированное число

Рейнольдса. Диаграмма для вышеуказанной функции применительно к мелкой дробленой пемзе представляет собой на графике в логарифмических координатах прямую линию. Отдельные точки достаточно удовлетворительно располагаются на этой прямой. Однако, экспериментальные данные Блейка по сопротивлению насадки из кускового материала не увязываются с данными для полых материалов (кольца), а его выводы базируются, к сожалению, на небольшом экспериментальном материале.

Берк и Племмер²⁷ пытались подвести теоретическое обоснование под уравнение, предложенное Блейком.

Ими были проведены опыты по определению сопротивления сухой насадки из свинцовой дроби размером 1,5, 3,1 и 6,4 мм.

Полученные Берком и Племмером данные для сопротивления слоя свинцовой дроби и некоторые цифры Блейка по пемзе достаточно удовлетворительно согласуются между собой, но охватывают лишь незначительный интервал скорости газового потока.

В 1929 г. Фернесом²⁸ были опубликованы результаты работы по исследованию падения давления при прохождении газового потока (воздуха) через слой дробленых твердых материалов применительно к определению сопротивления доменных шихт.

Опыты по определению потери напора производились в трубах с диаметром от 25 до 150 мм, заполненных измельченным материалом; высота слоя материала во всех опытах равнялась 750 мм.

Фернесом были проведены определения сопротивления кусков железной руды, кокса, антрацита, битуминозного угля и известняка при скоростях воздуха в пределах от 0,1 до 1 м/сек. Средний размер частиц кускового материала в отдельных опытах колебался в пределах 1,14 до 24,1 мм.

Работа Фернеса дала весьма обширный цифровой экспериментальный материал по гидравлическому сопротивлению кусковых материалов, употребляемых в составе доменной шихты. К сожалению, его метод обработки экспериментальных данных и полученные им уравнения внушают сомнения. Отсутствие некоторых данных по характеристике примененных в его опытах кусковых насадок и в частности такого важного параметра, характеризующего гидравлические свойства насадки, как поверхность единицы объема насадки, не дает возможности обработать экспериментальные материалы Фернеса другими методами.

Фернес считает, что «при движении газа через слой измельчен-

ного материала потеря напора не является только функцией числа Рейнольдса, но зависит от ряда других переменных, а именно: физических свойств газа, размера и формы частиц, молекулярного веса газа».

Он установил, что способ построения диаграмм сопротивления насадки по экспериментальным данным, предложенный Блейком и применявшийся Берком и Племмером, дает не единую кривую, а ряд кривых для различных насадок в зависимости от вязкости газа и свободного объема насадки. Для случая движения газа через насадку при изотермических условиях Фернесом рекомендуется уравнение, аналогичное предложенным Цейсбергом и Рамзиным.

В уравнении Фернеса коэффициент сопротивления насадки и показатель степени скорости газа являются сложными функциями размера частиц, температуры, свободного объема, плотности, вязкости и молекулярного веса газа.

Большинство данных Фернеса было получено частью в условиях ламинарного режима потока, частью турбулентного. Поэтому установленное им влияние размера частиц и температуры на показатель степени скорости газового потока обуславливается переменным состоянием потока.

Фернес считает, что величиной, определяющей размеры твердых частиц неправильной формы, является эквивалентный диаметр — диаметр шара, имеющего объем, равный объему частицы.

Кроме размера куска, важна еще его форма. Форму он характеризует «фактором формы», математически определяя его отношением «эквивалентного диаметра» к среднему размеру частиц в мешах.

С нашей точки зрения понятие «фактор формы», предложенное Фернесом, никакого практического смысла не имеет.

Определяя влияние свободного объема, который характеризует собой живое сечение для прохода газа, Фернес считает, что имеются «мертвые места», через которые газ не проходит, вследствие чего живое сечение не соответствует свободному объему.

Свободный объем определяется уравнением:

$$\text{Св. объем} = 100 \left(1 - \frac{\text{насыпной вес материала}}{\text{истин. уд. вес материала}} \right).$$

Эффективное живое сечение насадки, по мнению Фернеса, равно свободному объему, умноженному на K , причем K является постоянной для данного типа насадки величиной.

Фернес указывает, что фактическая скорость газа, протекающего через свободные промежутки насадки, равняется скорости, определяемой из общего поперечного сечения пустого (не заполненного насадкой) скруббера, разделенной на эффективное живое сечение, а не на свободный объем, как предполагали Блейк, Берк и Племмер.

Он определил путем геометрического изучения, что эффективное живое сечение должно составлять для различных материалов от 10 до 20 % от общего сечения.

Эта часть работы Фернеса является недостаточно убедительной и мы со своей стороны не видим оснований при вычислении линейной скорости газа отдавать предпочтение методу Фернеса по сравнению с методом Блейка. Хотя действительная скорость газа в насадке, благодаря извилистости и непостоянству сечения каналов и будет отличаться от скорости, вычисленной из данных живого сечения (равного свободному объему), однако, они будут пропорциональны друг другу. Совершенно очевидно, что среднее живое сечение эквивалентно свободному объему насадки.

Фернес первый обратил внимание на влияние стенок скруббера на сопротивление находящегося в скруббере дробленого твердого материала. Он исследовал этот вопрос чисто математическим путем и нашел, что влияние стенок скруббера значительно при больших отношениях диаметра частицы насадки к диаметру скруббера. Большой свободный объем насадки у стенок скруббера, благодаря менее равномерному распределению насадки, обуславливает меньшее падение напора газа у стенок, чем в основной массе насадки.

Отношение эффективного живого сечения у стенок скруббера к общему эффективному живому сечению в скруб-

бере круглого сечения зависит от $\frac{d}{D}$, т. е. от отношения диаметра частицы насадки к диаметру скруббера. Следовательно, фактор влияния стенки является

функцией величины $\frac{d}{D}$. На рис. 9 по-

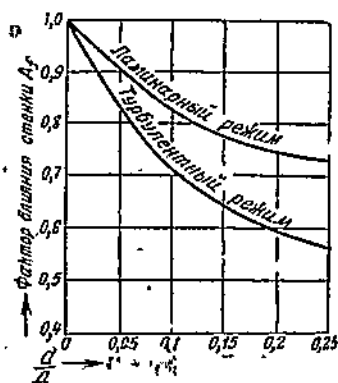


Рис. 9. Фактор влияния стенки скруббера на сопротивление насадки со свободным объемом 0,5, как функция $\frac{d}{D}$ (по Фернесу).

казаны кривые этой зависимости, составленные Фернесом для насадки из кускового материала со свободным объемом, равным 0,5. Фернес приводит также кривые и для насадок с другим свободным объемом, однако сомнительно, чтобы при применении его метода можно было добиться лучших результатов, чем при пользовании кривыми рис. 9, так как самый метод является очень приблизительным. При пользовании графиком Фернеса, необходимо умножать расчетную величину сопротивления насадки на числовое значение

A_s , соответствующее данному значению $\frac{d}{D}$.

Фернес изучал также влияние характера поверхности стенок скруббера на величину потери напора, для чего проводились опыты в латунных и железных трубах, причем было найдено, что материал

стенок в отличие от пустых труб не оказывает влияния на потерю напора газа. Далее было доказано, что при изменении высоты слоя насадки потеря напора на единицу высоты слоя остается постоянной.

Таким образом, хотя работа Фернеса и не устанавливает общей закономерности движения газового потока в трубах с насадкой из кусков твердого материала, а обширные экспериментальные данные, полученные им, применимы в ограниченном интервале условий, однако, она вносит много ценного в изучаемый нами вопрос. В 1931 г. эта работа была продолжена Фернесом совместно с Джексоном²⁹.

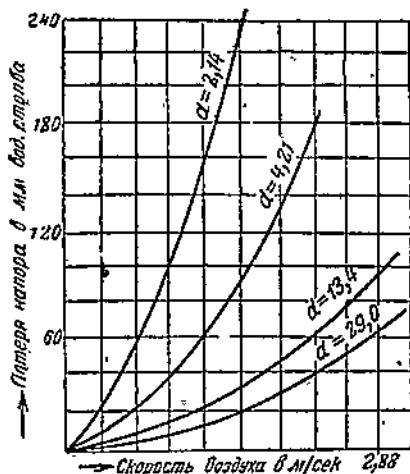


Рис. 10. Потеря напора воздуха при движении через слой железной руды из кусков различного размера, как функция скорости воздуха (по данным Шаповалова).

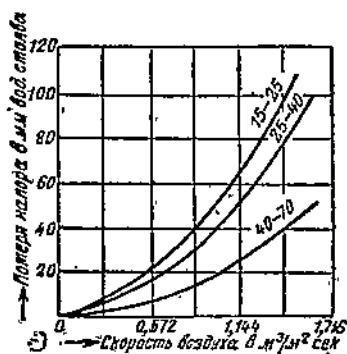


Рис. 11. Потеря напора воздуха при движении через слой кокса из кусков различного размера, как функция скорости воздуха (по данным Шаповалова).

Позднее изучению гидравлического сопротивления доменных шихт были посвящены работы Шаповалова³⁰ и Вагнера, Гольшут и Барта³¹. Шаповалов проводил опыты в железном футерованном цилиндре с внутренним диаметром 500 мм и высотой 1700 мм. В пяти точках по высоте цилиндра определялись потери напора.

Исследовалась железная руда и кокс. Максимальный размер кусков руды 31 мм, минимальный — 1 мм.

Руда рассеивалась на следующие фракции:

№ фракции	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Размер кусков в мм	1—2,5	2,5—4	4—11	11—13	13—15	15—19	19—25	25—28	28—31

Кокс рассеивался на 3 фракции:

15—25 мм; 25—40 мм; 40—70 мм.

Свободный объем и средний «эквивалентный диаметр» насадки из отдельных фракций определялся по методу Фернеса.

На рис. 10 даны полученные Шаповаловым кривые потери напора воздуха в мм водяного столба на 1 м высоты слоя в зависимости от скорости воздуха для фракций руды I, III, V и IX. На кривых приведены значения среднего «эквивалентного диаметра» кусков указанных фракций.

Кривые потери напора воздуха для различных фракций кокса даны на рис. 11.

Так же, как и Фернес, Шаповалов считает, что потеря напора для потока воздуха в сыпучих телах не является функцией числа Рейнольдса и для обобщения своих экспериментальных данных исходит из уравнения $\Delta P = a w^b$, в котором показатель степени b и коэффициент a являются функцией размера кусков. Величина a уменьшается с увеличением размера кусков, величина b — возрастает. Путем обработки своих экспериментальных данных Шаповалов нашел, что:

$$a = \frac{hn}{d},$$

где h — высота слоя в метрах,

$$n = (1 - n_1),$$

где n_1 — объем пустот или свободный объем в долях единицы;

d — средний «эквивалентный диаметр» частицы.

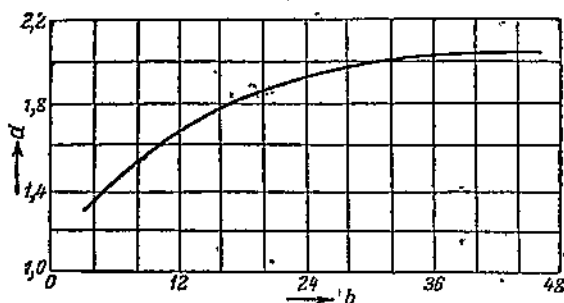


Рис. 12. Значение показателя степени b в уравнении Шаповалова, как функция «эквивалентного диаметра».

Тогда окончательное уравнение приобретает вид:

$$\Delta P = \frac{hn}{d} w^b. \quad (4)$$

Для значений b как функции d — Шаповаловым составлен график, который приведен на рис. 12.

Эмпирическое уравнение, учитывающее

изменение физических свойств газа, дается Шаповаловым в следующем виде:

$$\Delta P = \alpha_1 z q \frac{hn}{d} w^b, \quad (5)$$

где $\alpha_1 = 0,75$;

$$z = \frac{\mu_1}{\mu};$$

μ_1 — вязкость газа при данных условиях;

μ — вязкость воздуха при 15° С;

$$q = \frac{\gamma}{1,22};$$

γ — удельный вес газа;

1,22 — удельный вес воздуха в опытах Шаповалова.

Вагнер, Гольшуг и Барт совершенно правильно считают, что формулы, которыми пользуются Цейсберг, Рамзин, Фернес, а также и Шаповалов, имеют ограниченное применение. Для потери напора в случае ламинарного режима движения газа, когда решающее значение имеет вязкость газа, ими предлагается следующее уравнение:

$$\Delta P = \beta \frac{h}{f^2} \cdot \frac{c}{V_{cs}} \cdot \frac{\mu}{2g}, \quad (6)$$

где h — высота слоя в м;

f — средний диаметр кусков, равный диаметру шара того же объема, что и средний объем отдельного куска;

$c = \frac{Q}{F}$ — скорость газа в м/сек, где Q — расход газа в м³/сек и

F — общее поперечное сечение шихты в м²;

V_{cs} — свободный объем насадки;

μ — вязкость газа в кг. сек/м²;

β — постоянная, зависящая от формы тела

$$\frac{c}{V_{cs}} = \frac{Q}{FV_{cs}} = c_1.$$

Уравнение (6) аналогично закону Пуазейля и Стокса для труб.

В случае, когда гидравлический режим потока определяется чисто инерционными силами и внутреннее трение не играет решающей роли, потеря напора будет пропорциональна кинетической энергии $\gamma \frac{c_1^2}{2g}$ и числу изменений направления потока, зависящего от размера кусков насадки. Отсюда получается уравнение:

$$\Delta P = \alpha \frac{h}{f} \cdot \frac{c^2}{V_{cs}^2 2g} \gamma; \quad (7)$$

где α — постоянная или коэффициент сопротивления.

В производстве можно найти случаи, когда соотношение между вязкостью и инерционными силами постоянно: в этом случае из уравнений (6) и (7) получаем:

$$\gamma \frac{c^2 h}{f V_{cs}^2} : \frac{h}{f^2} \frac{c}{V_{cs}} \mu = \frac{c f \gamma}{\mu V_{cs}} = \text{const.}$$

Величина $\frac{cf\gamma}{\mu V_{co}}$ является безразмерным числом, а именно, числом Рейнольдса для насадок.

В уравнении (7) величина α является, собственно говоря, не постоянным числом, а функцией

$$\alpha = \varphi(Re).$$

Для больших значений Re — α имеет постоянную величину, для малых, когда преобладающее значение имеет вязкость, $\alpha = \frac{\beta}{Re}$, так как в этом случае уравнение (7) превращается в уравнение (6).

Если имеется смесь зерен различной величины в число Re войдет средний диаметр f_m

$$f_m = \frac{a_1 - a_2}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{f}},$$

где a — остаток в % на сите с диаметром f ;

a_1 и a_2 — границы изменений диаметра.

Вагнер, Гольшуг и Барт проводили свои опыты в колонне с внутренним диаметром 1500 мм и высотой 5000 мм.

Результаты опытов по определению потерь напора воздуха в насадке из кокса различного размера даны на рис. 13.

Проводились также опыты со смесью кусков различной величины,

а также в присутствии мелочи в шихте. В последнем случае потеря напора была всегда больше. Это и понятно, так как мелкие куски располагаются в промежутках между большими, что приводит к значительному уменьшению свободного объема насадки.

На основе опытов с помощью уравнения (7) определен коэффициент сопротивления α , как функция числа Re (рис. 14). Из рис. 14 видно, что при малых числах Рейнольдса уменьшение α обуславливается возрастающим влиянием вязкости в этих условиях.

Для каждой насадки и каждого числа Re имеется определенная величина потери напора. Разница в величине коэффициентов сопротивления для различных насадок определяется разницей в их

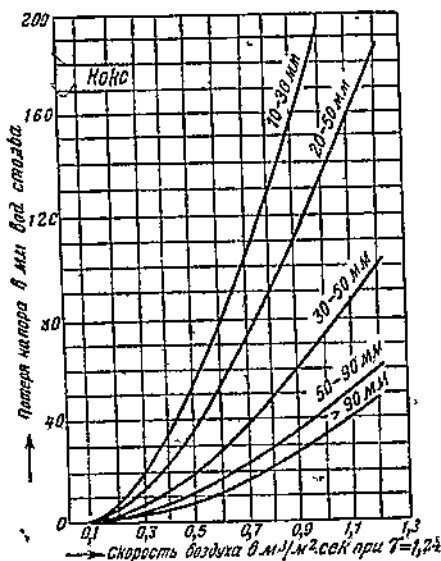


Рис. 13. Потеря напора воздуха при движении через слой кокса из кусков различного размера, как функция скорости воздуха (по данным Вагнера, Гольшуга и Барта).

форме. При числах Re выше 7000 практически $\alpha = \text{const}$. Указанное выше исследование в применении к доменным шихтам было продолжено в 1933 г. Бартом и Эссером ³².

Из всех работ, посвященных изучению гидравлического сопротивления сухих насадок из кусков твердых материалов, наибольший интерес представляет работа Чильтона и Кольборна ³³, опубликованная ими в 1931 г.

Чильтон и Кольборн изучали теплопередачу и падение напора при движении газа в трубе с насадкой из кускового материала. Опыты проводились в трубе с внутренним диаметром 75 мм, заполненной последовательно каменными шариками с диаметром 4,8 мм, гранулами 6 и 3 мм, окатанной галькой 13 мм, фарфоровыми шарами 22,5 мм и цинковыми шарами 25 мм. Таким образом, данные Чильтона и Кольборна относятся к сплошным насадкам небольшого размера. Весовая скорость воздуха менялась в пределах от 0,9 кг/м² до 2,9 кг/м².

Потери напора газа при движении через насадку происходят вследствие трения газа о поверхность насадки и вследствие сужения и расширения газового потока, проходящего через неправильные каналы переменного сечения, образованные элементами насадки. Нами были проведены опыты по определению среднего живого или свободного сечения насадки из колец Рашига и кускового материала ³⁴. Опыты показали, что живое сечение по высоте насадки непостоянно и то уменьшается, то увеличивается против среднего значения живого сечения, которое всегда численно (в долях единицы или в % от общего сечения) соответствует свободному объему.

Методика проведения опытов заключалась в следующем. В железный бачок с внутренним диаметром 300 мм, снабженный водомерным стеклом со шкалой, приливалась из мерного цилиндра вода в таком количестве, чтобы уровень в водомерном стекле поднялся на 2 мм. Объем прилитой воды, деленный на высоту, давал нам площадь поперечного сечения бачка. Сначала таким образом был откалиброван пустой бачок на высоту в 200 мм (было сделано 100 замеров). Затем в бачок загружалась насадка и снова производились замеры на высоту 200 мм. В каждом замере фиксировалось количество прилитой воды, необходимой для поднятия уровня в бачке на высоту в 2 мм. Делением объема прилитой воды на величину повышения уровня находилось в каждом отдельном случае живое сечение насадки. Затем строился график изменения живого сечения насадки по высоте. По графику находилось среднее живое сечение на-

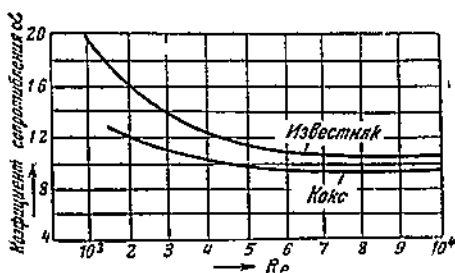


Рис. 14. Коэффициент сопротивления α , как функция Re (по данным Вагнера, Гольшуга и Барта).

садки и подсчитывалось количество расширений и сужений живого сечения против среднего значения на единицу высоты слоя, а также вычислялось среднее арифметическое значение максимального и минимального живого сечения в % от общего сечения скруббера. Результаты опытов даны в табл. 6.

Таблица 6

Н а с а д к и	Количество расши- рений и сжатий по замеру	Количество расширений и сжатий на 1 м высоты насадки		Среднее живое се- чение	Среднее максималь- ное сечение	Среднее минималь- ное сечение
		Расши- рение	Сжатие			
Кольца 50×50 мм, керам.	60 на высоту 188 мм	159,5	159,5	78,5%	91,3%	67,8%
Кольца 35×35 мм . . .	62 » » 184 »	168,5	168,5	78,0%	89,1%	66,9%
Кольца 25×25 » »	58 » » 156 »	186	186	74,6%	86,3%	64,4%
Кольца 15×15 » »	60 » » 152 »	197,5	197,5	70,0%	80,0%	60,0%
Кокс разм. 40,8 » . . .	54 » » 170 »	159	159	54,5%	61,5%	44%
Андезит 43,2 мм	58 » » 180 »	161	161	54,5%	63,5%	45,5%
Кокс разм. 28,6 мм . . .	52 » » 154 »	169	169	53,5%	—	—
Кокс разм. 24,4 мм . . .	66 » » 176 »	192,5	192,5	53,2%	58,8%	44,9%

На рис. 15 и 16 в качестве примера приведены графики для керамических колец Рашига размером 15×15 и 25×25 мм.

Чильтон и Кольборн принимают, что примерно только 10% от всей потери газа при прохождении его через насадку вызывается поверхностным трением газового потока; остальные 90% потери напора обусловлены расширением и сжатием газовой струи. Количественное определение Чильтона и Кольборна доли потерь напора от поверхностного трения и расширения и сжатия газовой струи не достаточно убедительно, так как оно основано на сомнительных данных Фернеса о среднем живом сечении кусковой насадки, составляющем, по его мнению, всего лишь 10—20% от общего сечения. Тем не менее бесспорно, что потери напора от расширения и сжатия газового потока являются преобладающими в общем значении потери напора при движении газа в беспорядочно загруженной насадке.

Потеря напора от сжатия и расширения газовой струи пропорциональна квадрату скорости газа, а так как она является преобладающей в общей потере напора, то последняя будет также приблизительно пропорциональна квадрату скорости газа. Поэтому Чильтон и Кольборн, основываясь на уравнении Фанинга для трения в

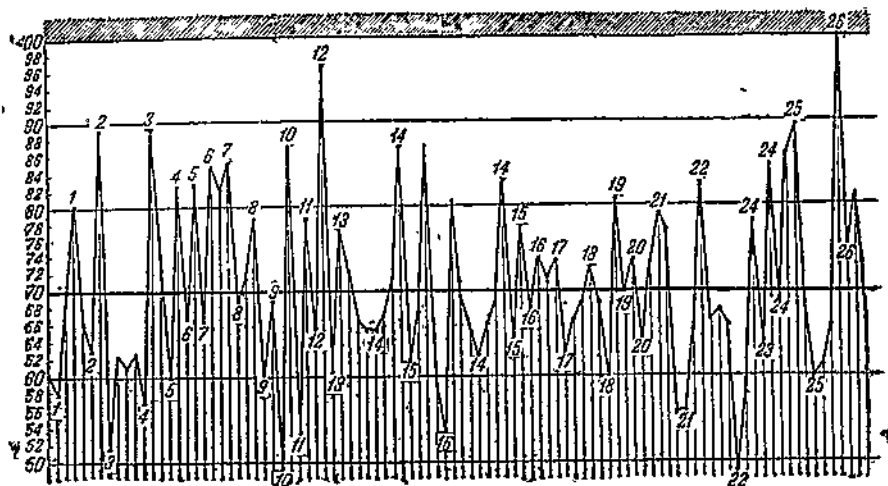


Рис. 15. График изменения живого сечения по высоте скруббера для насадки из колец Рашига размером 15×15 мм.

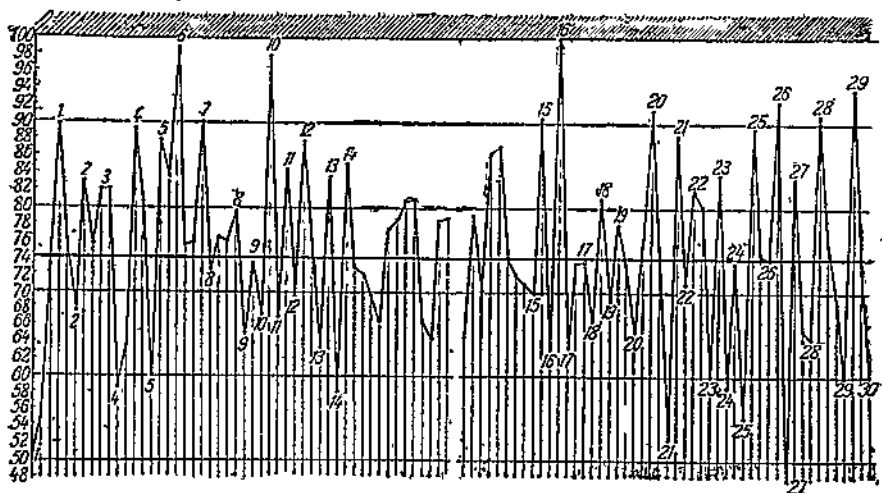


Рис. 16. График изменения живого сечения по высоте скруббера для насадки из колец Рашига размером 25×25 мм.

Абсцисса—высота слоя насадки (научное деление равно 2 мм); ордината—живое сечение насадки в %.

трубах предложили следующее уравнение для вычисления потери напора газа при движении через насадку из кускового материала:

$$\Delta P = \frac{2 f' A_f \rho u_0^2 h}{g d_p}, \quad (8)$$

где ΔP — падение напора на высоте h ;
 u_0 — скорость газа, считая на полное сечение пустого скруббера;
 ρ — плотность газа;
 A_f — коэффициент влияния стенок;
 f' — коэффициент трения;
 g — ускорение силы тяжести;
 d_p — номинальный размер элементов, насадки.

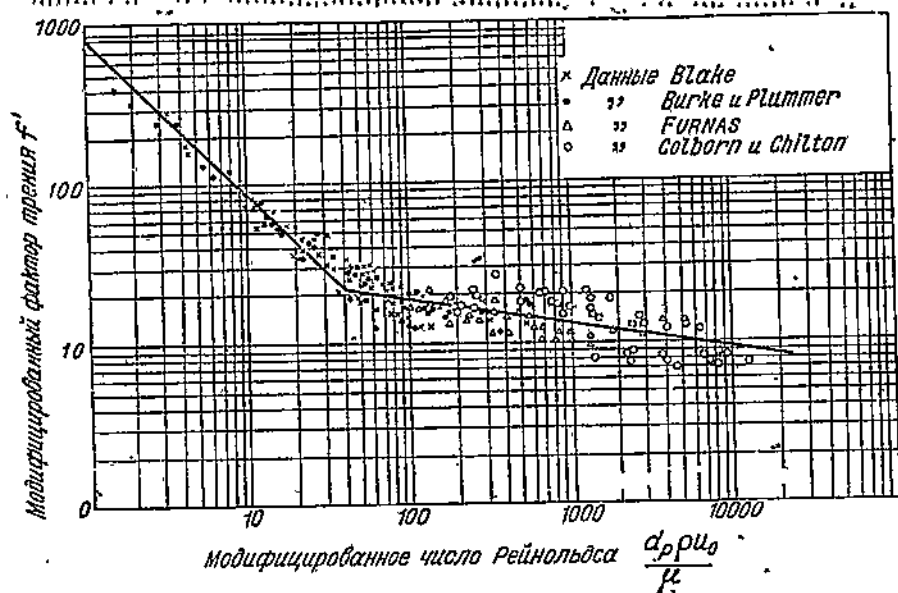


Рис. 17. Коэффициент трения f , как функция модифицированного числа Рейнольдса (по Кольборну и Чильтону).

В отличие от уравнения для сопротивления в трубах коэффициент трения f в уравнении (8) представляет собой общий коэффициент сопротивления, состоящий из сопротивления за счет трения газового потока о поверхность насадки и сопротивления за счет расширения и сжатия газового потока.

Чильтон и Кольборн представили в графической форме в логарифмических координатах коэффициент трения f' как функцию модифи-

цированного числа $Re = \frac{d_p u_0 \rho}{\mu}$. Диаметр трубы в числе Re в данном случае заменен номинальным размером элемента насадки, ибо, по мнению авторов, диаметр каналов насадки пропорционален диаметру отдельных элементов.

График Чильтона и Кольборна дан на рис. 17. Две ветви кривой графика Чильтона и Кольборна типичны для диаграммы коэффициента трения. При построении графика Чильтон и Кольборн использовали наряду с собственными данными также некоторые данные Блейка, Берка и Племмера и Фернеса, а также неопубликованные данные Рея и Крейзингера и Брукса, Бичелла, Остина и Орра, заимствованные из работы Фернеса. На графике Чильтона и Кольборна имеет место довольно большое рассеяние точек. Однако, не следует забывать, что данные относятся к кусковой насадке неправильной формы, а также к геометрически подобным формам, как, например, шарики. Сплошная ломаная линия, проходящая через группу точек на графике 17, рекомендуется Чильтоном и Кольборном для сухих сплошных элементов. Однако, график Чильтона и Кольборна действителен лишь для сравнительно мелкой кусковой насадки — в пределах до 25 мм. Точки для более крупной насадки значительно отклоняются от линии на графике. Причина этого заключается в том, что диаметр частицы d_p , входящий множителем в число Re , не является величиной, достаточно характеризующей гидравлические свойства насадки. Это обстоятельство ограничивает условия применения графика Чильтона и Кольборна. Тем не менее работа Чильтона и Кольборна вносит большую ясность в изучаемый нами вопрос и представляет собой значительный шаг в направлении разработки общего метода расчета сопротивления скрубберных насадок.

Анализируя данные о сопротивлении мелких сухих сплошных насадок Чильтон и Кольборн нашли, что критическая скорость, до которой существуют условия ламинарного (вязкостного) режима движения, связана с диаметром насадочных элементов d_p , с плотностью газа ρ и с его вязкостью μ следующей зависимостью:

$$\frac{d_p \rho u_0}{\mu} \cong 40-50.$$

При движении же газа в пустых трубах число Re , соответствующее переходу ламинарного режима в турбулентный, равно 2300—2500. Таким образом, насадка является искусственным фактором турбулентности потока.

В ламинарной области по Чильтону и Кольборну, сопротивление насадки пропорционально 1-й степени μ и u_0 и обратно пропорционально квадрату d_p . В турбулентной области сопротивление пропорционально ρ в степени 0,85, μ в степени 0,15, u_0 в степени 1,85 и обратно пропорционально d_p в степени 1,15.

Так как Чильтон и Кольборн проводили свои опыты в башне небольшого диаметра при большом числом значении $\frac{d}{D}$, то эффект

влияния стенок трубы на падение напора газа был значительным. Поэтому при обработке экспериментальных данных и построении графика (рис. 17) они воспользовались «коэффициентом влияния стенок» A_1 (см. рис. 9), вычисленным Фернесом: A_1 равен единице для башни большого размера, заполненной насадкой из небольших элементов. При расчете потери напора газа в башнях малого диаметра, заполненных сухой кусковой насадкой, необходимо пользоваться одновременно графиками рис. 17 и 9.

Чильтон и Кольборн сделали попытку обработать имевшиеся к тому времени немногочисленные данные Блейка и Арнольда по сопротивлению полых кольцевых насадок. Арнольд³⁵ определил сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером $25 \times 25 \times 3,5$ мм, трехгранных колец размером $44 \times 5 \times 5$ мм и проволочных спиралей размером 25×25 мм, как сухих, так и орошаемых небольшим количеством воды.

На рис. 18 показано сопротивление сухих и орошаемых водой

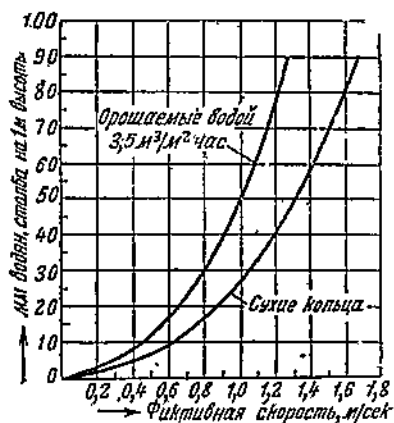


Рис. 18. Сопротивление 25-мм колец Рашига, как функция скорости воздуха при плотности воздуха $\gamma = 1,24$ (по данным Арнольда).

керамических колец Рашига размером $25 \times 25 \times 3,5$ мм в количестве $3,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ (по данным Арнольда). Как и следовало ожидать, падение напора в насадке из полых материалов, например, колец Рашига, значительно меньше, чем в кусковой насадке из сплошных элементов того же размера. Это объясняется более низкой фактической скоростью газа при прохождении через насадку, поскольку свободный объем, а стало быть, и эффективное живое сечение насадки значительно больше в случае применения полых элементов, чем сплошных.

Однако, Чильтону и Кольборну не удалось установить какой-либо общей закономерности для колец и других полых элементов.

Еще сложнее оказался вопрос о сопротивлении насадок в случае орошения последних жидкостью. Жидкость при движении по насадке сверху вниз занимает значительную часть пустот и уменьшает свободный объем и живое сечение насадки. Поэтому при одинаковой нагрузке скруббера по газу, т. е. при постоянной скорости газа (считая на общее сечение пустого скруббера) потеря напора газа больше в орошаемой насадке, чем в сухой. Возрастание потери напора тем больше, чем больше интенсивность циркуляции, т. е. плотность орошения насадки жидкостью. Это влияние циркуляции жидкости на падение напора было отмечено еще Цейсбергом.

В качестве универсальной формулы для вычисления потери напора как в сухой, так и орошаемой насадке Чильтон и Кольборн предложили следующую:

$$\Delta P = - \frac{2 f' A_f A_p A_s \rho u_0^2 h}{g d_p} \quad (9)$$

В отличие от уравнения (8) эта формула, помимо коэффициента влияния стенок скруббера A_f содержит еще два поправочных коэффициента, которые должны быть установлены экспериментально:

A_p — поправочный коэффициент для полых насадок;

A_s — поправочный коэффициент на смачивание насадки циркулирующей жидкостью.

В 1934 г. в университете Северной Каролины было проведено исследование Нью³⁶, а затем Розе и Хайби³⁷ по определению сопротивления керамических колец Рашига размером 9,5—32 мм в лабораторной колонне диаметром 150 мм при пропускании воздуха и орошении водой.

Лакстон и Губер³⁸ провели такое же исследование в колонне диаметром 75 мм. На основании экспериментального материала указанных исследователей, а также некоторых данных Маха и Берля, Мак-Лорен Уайт³⁹ в 1936 г. сделал попытку установить для сопротивления кольцевых насадок закономерность, аналогичную установленной Чильтоном и Кольборном для мелких кусковых насадок. Пользуясь поправочным коэффициентом влияния стенок, ему удалось нанести экспериментальные точки для кольцевых насадок на диаграмму Чильтона и Кольборна. К сожалению, экспериментальный материал, которым оперировал Уайт, был недостаточен и охватывал довольно узкий интервал в области турбулентного режима движения. Данные в области ламинарного режима движения отсутствовали вовсе. На диаграмме имело место значительное рассеяние точек для колец различного размера. Отклонение отдельных точек от прямой составляло больше 50%. Точки, характеризующие коэффициент сопротивления насадки из элементов Берля (по данным Берля и Маха), расположились значительно выше на прямой, параллельной прямой Чильтона и Кольборна.

Уайт в своей работе показал, что фактор влияния стенки Фернеса, принятый Чильтоном и Кольборном для обработки данных по кусковым материалам, совершенно неудовлетворителен для применения к пустотелым насадкам (кольца) или насадкам сложной геометрической формы, как элементы Берля. Математическое вычисление эффекта влияния стенок для этих насадок он считает безнадежно трудным и поэтому со своей стороны предлагает эмпирический поправочный фактор F_a , являющийся функцией размера частиц. Этот поправочный коэффициент был вычислен Уайтом, принявшим кривую Чильтона и Кольборна за стандарт.

В работе Уайта приводится график для поправочного коэффициента влияния стенки, являющегося функцией диаметра элементов

насадки. При этом нужно, однако, иметь в виду, что фактор влияния стенки башни является не только функцией диаметра элементов насадки, но и свободного объема насадки. Чем больше свободный объем, тем меньше влияние стенки при одинаковых линейных размерах элементов насадки.

Как будет показано ниже, наш метод обработки экспериментальных результатов исключает необходимость пользования поправочным коэффициентом влияния стенки.

Влияние стенки башни на сопротивление обусловлено неравномерностью распределения насадки у стенок башни и проявляется лишь при загрузке крупной насадки в башню малого диаметра. Влияние стенки отсутствует в башнях с большим диаметром, заполненных насадкой небольших размеров. Таким образом, для исключения влияния стенки в опытах необходимо соблюдать определенное отношение диаметра башни к диаметру элементов насадки.

Мак Лорен Уайт утверждает, что, если D башни превышает d элементов насадки более чем в 6 раз, влияние стенок башни на сопротивление насадки становится исчезающе малым. Наши опыты показали, что это верно лишь при отношении $\frac{D}{d} \approx 9$.

Обстоятельным исследованием, посвященным определению потери напора газа как в сухих, так и орошаемых насадках из колец и других полых элементов, является работа Маха⁴⁰. Мах определил сопротивление фарфоровых колец Рашига размером 8×8 , 15×15 и 25×25 мм, седлообразных элементов Берля размером 10×10 , 15×15 и 25×25 мм и треугольных элементов Прима (железных и глиняных) нескольких размеров (от 4 до 30 мм).

Мах проводил опыты в башне диаметром 300 мм с высотой насадки 2 м при скоростях воздуха 0,3—3 м/сек (считая на сечение пустой башни) и плотности орошения водой от 0 до 12 м³/м² час. С целью исследования влияния физических свойств газа и орошающей жидкости (плотность и вязкость) им были проведены опыты с мелкими насадками в колонне с диаметром 110 мм. В качестве газов с различной плотностью и вязкостью в этих опытах были применены: воздух ($\gamma = 1,2$ кг/м³), углекислый газ ($\gamma = 1,8$ кг/м³) и светильный газ ($\gamma = 0,55$ кг/м³). В качестве орошающих жидкостей были применены: вода (1° по Энглеру), 50%-ный раствор глицерина (2° Е) и 75%-ный раствор глицерина (5° Е).

Для подсчета сопротивления 1 м слоя насадки Мах пользуется уравнением:

$$\Delta P = a w^n,$$

в котором a и n имеют разное числовое значение для каждой насадки.

Значения a и n , в зависимости от плотности орошения, найденные из опытов в большой башне при работе с воздухом для 15 и 25-мм колец Рашига, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Размеры колец в мм	Плотность орошения в м³/м² час					
	0	1	2	4	8	12
15×15 и	1,82	1,89	1,89	1,91	1,92	1,94
а	67	89	104	114	130	150
22×25 и	1,88	1,95	1,98	2,0	2,03	2,04
а	33	42	44,2	46,5	51	57

Из опытов на малой колонне Мах нашел, что сопротивление сухих насадок пропорционально плотности газа в степени 0,83. Влияние вязкости газов оказалось незначительным.

Общее уравнение для потери напора при прохождении газа через сухие фарфоровые кольца Рашига в зависимости от плотности газа и размера колец по данным Маха имеет следующий вид:

$$\Delta P = 0,27 h \frac{w^{1,85} \gamma^{0,83}}{d^{1,27}}, \quad (10)$$

где h — высота слоя в м;

w — скорость газа в м/сек, считая на полное сечение скруббера;

γ — удельный вес газа в кг/м³;

d — диаметр колец в м.

Аналогичное уравнение для фарфоровой седлообразной насадки Берля имеет вид:

$$\Delta P = 0,13 h \frac{w^{1,82} \gamma^{0,83}}{d^{1,27}}. \quad (11)$$

Из опытов Маха с орошением мелких насадок (8—10 мм) жидкостями различной вязкости следует, что при повышении вязкости орошающей жидкости в 2 раза коэффициент a (табл. 7) возрастает на 5—10%; при увеличении вязкости в 5 раз наблюдалось возрастание a на 35—50%.

Несмотря на большой экспериментальный материал, работа Маха имеет ряд существенных недостатков, снижающих ее ценность.

Прежде всего, в работе отсутствует характеристика насадок, применявшихся в опытах. Не приведены данные о свободном объеме, поверхности, количестве элементов в единице объема, являющихся важнейшими параметрами, определяющими гидравлические свойства насадок. Даны лишь высота и диаметр колец без указания даже толщины стенки.

Опыты проводились в ограниченном интервале плотностей орошения — всего лишь до $12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$, тогда как в ряде весьма распространенных абсорбционных процессов практикуются значительно большие плотности орошения.

Мах не устанавливает общей закономерности сопротивления скрубберных насадок, предлагая в каждом отдельном случае пользоваться для вычисления потери напора эмпирическим уравнением, характерным для данного типа и размера насадки.

Известная часть экспериментальных данных Маха представляет ценность для проектирования скрубберных установок. Данные о сопротивлении 15 и 25 мм керамических колец Рашига показали полное совпадение с результатами нашей работы и были использованы нами при обработке экспериментального материала.

В 1936, 1937 гг. и позднее изучение сопротивления скрубберных насадок из колец Рашига, кускового материала и деревянных решеток было проведено в МХТИ им. Менделеева автором настоящей работы ⁴¹. Экспериментальные данные и результаты этого исследования и были положены в основу разработки приводимого нами ниже общего метода расчета сопротивления скрубберных насадок.

Первые работы по определению падения напора в кольцевых насадках после Цейсберга и Блейка были проведены Дежюссье ⁴² и Арнольдом ³⁵.

Дежюссье определил сопротивление керамических и железных колец Рашига размером 15, 25 и 50 мм при плотности воздуха $\gamma = 1,2$ и орошении $6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$.

В работе Дежюссье не дана характеристика колец и не указаны условия проведения опытов.

Графики Дежюссье приведены в книге Павлова и Семенова ⁴³.

В «Атласе диаграмм по расчетам химической аппаратуры» Павлова ⁴⁴ дана диаграмма для сопротивления кольцевой насадки $25 \times 25 \text{ мм}$ при орошениях 0; 2,5; 5 и $8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$.

Джонстон ⁴⁵ на основе опытов в четырехугольной башне с площадью поперечного сечения $0,05 \text{ м}^2$ пришел к выводу, что гидравлическое сопротивление насадок пропорционально скорости газа в степени 1,8. Для воздуха при скорости 1 м/сек (считая на сечение пустой башни) Джонстон нашел сопротивление слоя кольцевой насадки высотой в 1 м равным: для колец Рашига размером $25 \times 25 \text{ мм}$ — 29,2 мм водяного столба, для спиральных колец размером $75 \times 75 \text{ мм}$ при правильной укладке в шахматном порядке — 4,66 мм в. с. Джонстон отмечает, что его цифры показывают в 4 раза меньшее сопротивление для колец, чем это было получено Цейсбергом. Сухие 25-миллиметровые кольца показывают, по данным Джонстона, сопротивление в 2 раза меньшее, чем те же кольца при орошении водой в количестве $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$. Спиральные 75-миллиметровые кольца в сухом виде и при орошении их водой в количестве $4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ показали одинаковое сопротивление. Наряду с кольцевыми насадками, Джонстон определил также сопротивление насадок, состоя-

щих из вертикальных гладких пластин, вертикальных рифленых пластин с горизонтальным рифлением различной глубины и частоты. Сопротивление скрубберных насадок определялось Джонстоном попутно с изучением абсорбции двуокиси серы из дымовых газов в скрубберах. На основе своих данных по абсорбции и потере напора Джонстон приходит к выводу, что наиболее желательной насадкой для скрубберов, рассчитанных на обработку больших количеств дымовых газов, является насадка из решеток с каналами в 1,5 дюйма и с индивидуальными секциями от 4 до 6 дюймов высотой.

Ушида и Фуджита⁴⁶ в 1934—35 гг. опубликовали ряд работ по сопротивлению скрубберных насадок, из которых первые две касаются сухих насадок из элементов небольшого размера (кольца и кусочки размером до 10 мм). В 1936 г. те же авторы⁴⁷ на основе опытов с орошаемыми фарфоровыми кольцами (размером 15, 26 и 35 мм) в башнях диаметром 260 мм и с высотой слоя насадки 1400 мм дали несколько эмпирических уравнений для подсчета сопротивления кольцевых насадок.

Ушида и Фуджита, приняв за основу уравнение Фанинга в общей форме развили его и получили уравнение следующего вида:

$$\frac{\Delta P}{\rho l} = c \left(\frac{u^2}{2gd} \right)^p \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^q \left(\frac{D}{d} \right)^r, \quad (12)$$

где u — скорость газа, считая на сечение пустой башни;

d — диаметр колец;

$\frac{D}{d}$ — отношение диаметра башни к диаметру насадки.

Числовые значения показателей степени p , q и r были найдены экспериментальным путем.

Наши опыты в полном согласии с данными Ушида и Фуджита показывают, что $r = 0$ во всех случаях. Значение p , по определению Ушида и Фуджита, равно 0,94. Однако, наши опыты так же, как и экспериментальные данные, на которых основывается в своей работе Уайт, показывают, что гораздо целесообразнее принять значение p равным единице. В этом случае уравнение Ушида и Фуджита превращается в обычное уравнение Фанинга, значительно более удобное для оперирования. Свое уравнение для сопротивления сухой насадки Ушида и Фуджита применили и для вычисления сопротивления орошаемой насадки, введя добавочные коэффициенты. Однако, с нашей точки зрения вряд ли целесообразно пользоваться этими уравнениями, так как поправочные коэффициенты сильно меняются в зависимости от интенсивности орошения. Результаты получаются более надежными при пользовании непосредственно графиками, основанными на экспериментальных данных: Ушида и Фуджита работали при малых интенсивностях орошения. Однако, позднее они провели опыты и при больших

плотностях орошения⁴⁸. По данным Ушида и Фуджита при переходе от беспорядочной засыпки к правильной укладке колец сопротивление насадки снижается в 15—28 раз.

Кузьминых и Апахов⁴⁹ в УНИХИМе провели исследование сопротивления башенных насадок при плотности газа 1,13 (печной газ сернокислотной установки) и при орошении серной кислотой крепостью 59° В_в в количестве 20 м³/м² час. Опыты проводились в железной башне диаметром 1,2 м и высотой 3,1 м. В качестве насадки в опытах были применены кварц размером 50, 75 и 100 мм, кольца размером 50×50 мм при беспорядочной загрузке и при правильной укладке и пятигранные призмы.

Результаты опытов представлены в виде графика на логарифмической сетке, где по оси абсцисс отложена скорость газа в м/сек (считая на сечение пустой башни) и по оси ординат — сопротивление в мм водяного столба на 1 м высоты насадки (рис. 19). Для всех насадок на логарифмической сетке получились прямые линии с одним и тем же углом наклона, показывающим, что сопротивление пропорционально квадрату скорости газа. Для подсчета сопротивления насадок авторы предлагают пользоваться уравнением:

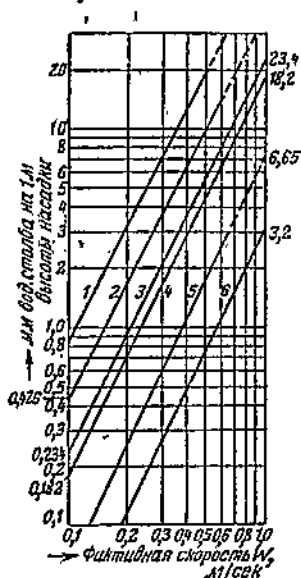


Рис. 19. Сопротивление кузовых и кольцевых насадок, как функция скорости газа при плотности газа $\gamma = 1,13$ и при орошении серной кислотой ~ 20 м³/м² в час.

1—кварц 50 мм, 2—кварц 75 мм, 3—кварц 100 мм, 4—кольца 50×50 мм, 5—пятигранные призмы, 6—кольца 50×50 мм в укладку.

$$\Delta P = kh \frac{\gamma}{1,13} w^2, \quad (13)$$

где k — коэффициент гидравлического сопротивления при $\gamma = 1,13$ и при $w = 1$ м/сек.

h — высота насадки.

Полученные Кузьминых и Апаховым результаты значительно расходятся с данными Цейсберга.

На основе литературных данных Юшмановым⁵⁰ составлена номограмма для сопротивления некоторых башенных насадок.

В 1940 г. была опубликована работа Е. Пайрета, Мана и Уолла⁵¹, посвященная

изучению сопротивления башенной насадки из гравия размером 42 мм. Опыты были проведены в большой башне диаметром 750 мм и высотой насадки 1800 мм при скорости воздуха от 0,0055 до 1,07 м/сек и орошении водой до 10 м³/м² час. Хотя Пайрет, Ман и Уолл считают, что их результаты для сухого гравия размером 42 мм приблизительно соответствуют зависимости падения напора

от скорости воздуха, установленной Чильтоном и Кольборном, однако расхождение составляет свыше 30%.

Обработка данных Пайрета и Мана по методу, принятому в данной работе, показала полное совпадение их результатов с результатами наших опытов для кусковых и кольцевых насадок.

В статье Киршбаума⁵² обсуждается вопрос о сопротивлении насадочных колонн в основном на базе экспериментальных данных цитированной выше работы Маха. Исследованию потери напора при движении газа в барботажной колонне с тарелками посвящена работа Роджерса и Тиля⁵³. Вопрос этот изучен в еще меньшей степени, чем сопротивление в насадочных колоннах.

Пределы нагрузки скрубберов по жидкости и газу («захлебывание» скрубберов)

Высота насадки абсорбционной башни определяет ее поглотительную способность или степень абсорбции, а поперечное сечение башни обуславливает пропускную способность или количество обрабатываемого газа при заданной плотности орошения. Очевидно, что для проектирования важно знать допустимые скорости газа и жидкости на единицу поперечного сечения башни.

Вопрос о пропускной способности скрубберов — о пределах нагрузки скрубберов по газу и жидкости — впервые был поставлен в наших работах по абсорбции CO_2 в скрубберах^{54, 55}. При изучении процесса абсорбции CO_2 водой в лабораторном скруббере диаметром 104 мм, заполненном 20 мм кольцами, мы столкнулись с таким явлением, когда при постоянной скорости газа и постепенном увеличении плотности орошения начинался интенсивный выброс жидкости из выхлопной трубы для газа. Это происходило при условиях, когда скруббер был далек от заполнения водой целиком и уровень воды в приемнике внизу скруббера, наблюдаемый по водомерному стеклу, оставался постоянным, а затем начинал падать.

Можно довести нагрузку до такого состояния, что большая часть или даже вся поступающая на орошение насадки жидкость начинает уноситься с газом. Мы называли это явление интенсивного выброса жидкости «захлебыванием» скруббера, которое и является пределом нагрузки скруббера. Опытами было установлено, что каждой скорости газового потока соответствует определенная плотность орошения насадки жидкостью, при которой имеет место захлебывание скруббера. И, наоборот, при любой плотности орошения имеется определенная скорость газа, соответствующая захлебыванию. Тогда же было констатировано, что при повышении давления пределы нагрузки скруббера повышаются, т. е. при постоянной весовой скорости газа в условиях повышенных давлений захлебывание наступает при более высоких

плотностях орошения. Было установлено также, что захлебывание скруббера зависит от типа и размера применяемой насадки. Подробнее явление захлебывания скрубберных насадок было исследовано нами в работах, посвященных изучению скрубберного процесса ^{34, 41}. Установление количественных соотношений для пределов нагрузки скрубберов являлось одной из основных задач в наших последующих работах по изучению гидродинамики скрубберного процесса, результаты которых будут изложены ниже.

Явление захлебывания было отмечено в работе сотрудников ГИА ⁵⁶ по изучению абсорбции CO_2 морской водой из дымовых газов. Вопрос о захлебывании скрубберов рассматривается также в указанной выше статье Мак-Лорена Уайта⁴⁰. Однако, вследствие недостаточности экспериментальных данных последний не делает попытки установления каких-либо количественных соотношений между захлебыванием и скоростями потоков. Беккер, Чильтон и Вернон приводят весьма немногочисленные данные относительно скоростей воздуха, при которых происходит захлебывание в некоторых насадках, через которые циркулирует вода в количестве около $2 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Питерс⁵⁸ нашел, что при орошении спиртом требуются значительно большие скорости воздуха для захлебывания, чем водой при той же насадке. Экспериментальный материал в виде таблиц, касающийся захлебывания насадок из колец Рашига размером 15, 26 и 35 мм при работе с воздухом и водой при атмосферном давлении, приводят в своей статье Ушида и Фуджита ⁴⁸.

В 1938 г. была опубликована интересная работа Шервуда, Шиплея и Голловой⁵⁹, в которой приведены данные по захлебыванию, экспериментально установленные в небольшой стеклянной колонне диаметром 50 мм, заполненной угольными кольцами Рашига размером 12,7 мм; кольца загрохались в беспорядке. Особенно ценным в работе Шервуда с сотрудниками является то, что они исследовали влияние физических свойств газа и жидкости на захлебывание.

С целью определения влияния плотности газа на захлебывание первая серия опытов была проведена с водой в качестве орошающей жидкости и последовательно с воздухом, углекислым газом и водородом в качестве газовых потоков. Во второй серии в качестве газового потока был применен воздух при орошении последовательно водными растворами глицерина и другими жидкостями для определения влияния на захлебывание вязкости и плотности жидкости. Для исследования влияния поверхностного натяжения к воде добавлялась масляная кислота; при этом достигалось двухкратное изменение поверхностного натяжения. Кроме того, были испытаны растворы метанола в воде различной концентрации, у которых поверхностное натяжение менялось втрое по сравнению с водой. В опытах с системой — воздух — вода была применена, кроме колец Рашига, насадка из седлообразных элементов Берля того же размера.

Опыты Шервуда в полном соответствии с нашими данными показали, что плотность газа и жидкости и вязкость жидкости оказывают существенное влияние на захлебывание скруббера. При меньшей плотности газа и жидкости и меньшей вязкости жидкости захлебывание наступает при более высокой нагрузке скруббера по газу и жидкости. Поверхностное натяжение жидкости (в пределах от 73 до 25 *дин/см*) практически не оказывает влияния на захлебывание.

В работе Шервуда с сотрудниками опыты проводились в башне слишком малого диаметра, когда влияние стенок башни на распределение насадки велико. Поэтому пределы нагрузки, установленные их опытами, выше, чем данные наших опытов в башне с диаметром 300 мм.

В работе Шервуда не изучено также влияние формы и размеров насадки на захлебывание, так как опыты проводились с насадкой одного размера.

Однако, экспериментальный материал Шервуда о влиянии физических свойств потоков на захлебывание является весьма ценным и ниже использован нами при обработке и обобщении результатов нашего исследования.

Изучению процесса увлечения жидкости воздухом в тарельчатых колоннах, имеющего много общего с процессами захлебывания в насадочных скрубберах, посвящена работа Шервуда и Дженни⁶⁰. Косвенно этот вопрос затрагивается в статье Киршбаума⁶¹.

Количество жидкости, удерживаемое в насадке, и ее влияние на свободный объем

Определение количества жидкости, заполняющей насадку в зависимости от скорости потоков, и влияния ее на свободный объем насадки было впервые выполнено Симонсом и Осборном⁶². Они проводили опыты в стеклянной колонне с площадью поперечного сечения 3,11 *см*², вследствие чего полученные ими данные далеки от производственных условий. Были исследованы системы: воздух—вода и воздух — легкое масло. В качестве насадки применялись шарики диаметром 15—18,5 мм, коксовая мелочь 6—13 мм и стеклянные кольца 6×3×2 мм. Опыты показали, что количество жидкости, удерживаемое насадкой, возрастает, а свободный объем насадки уменьшается с увеличением интенсивности орошения. Опыты с обеими системами (воздух — вода и воздух — легкое масло) показывают, что свободный объем является линейной функцией интенсивности орошения. Наклон прямых идентичен для каждой системы и не зависит от типа насадки. Изменение свободного объема зависит только от физических свойств орошающей жидкости. Опыты Симонса и Осборна были проведены при скорости воздуха, равной нулю. Заметной перемены в изменении свободного объема при скорости

воздуха до 0,6 м/сек ими обнаружено не было. Поэтому они считают, что скорость воздуха не влияет на свободный объем насадки так же, как и физические свойства газа. Выводы Симонса и Осборна находятся в противоречии с результатами нашей работы, которые показывают, что количество удерживаемой жидкости, а стало быть, и свободный объем насадки зависит не только от интенсивности орошения, но также от типа насадки, физических свойств орошающей жидкости и скорости воздуха. Это противоречие объясняется тем, что указанные авторы работали с колонкой очень малого диаметра, когда велико влияние стенок на распределение насадки, при малых интенсивностях орошения и в очень узких интервалах изменения плотности орошения и скорости воздуха.

Вопрос о влиянии интенсивности орошения и скорости воздуха вскользь затронут в работе Майо, Гунтера и Нама⁶³.

Более подробно этого вопроса касаются в своей работе Ушида и Фуджита⁴⁸.

Пайрет, Ман и Уолл приводят в цитированной выше работе данные о количестве воды, удерживаемой в насадке из гравия.

Критические замечания и обоснование принятого метода исследования

Как показывает обзор литературы, изучение скрубберного процесса началось недавно. Наиболее интересные работы по отдельным вопросам гидродинамики скрубберного процесса появились в течение последних 6—8 лет. Однако, в целом гидродинамика скрубберного процесса до настоящего времени изучена далеко недостаточно. Опубликованные данные отдельных авторов ограничены сравнительно узкими пределами условий, в которых они работали. Данные о сопротивлении скрубберных насадок у большинства авторов не сопровождаются характеристикой самих насадок, с которыми они работали. Так, например, сопротивление насадки из колец Рашига определялось лишь в зависимости от скорости газового потока и линейных размеров колец. При этом не учитывалось влияние таких важных факторов, как толщина стенки колец; между тем, изменение толщины стенок колец при сохранении постоянных линейных размеров влечет за собой изменение свободного объема насадки, а стало быть, живого сечения для прохода газового потока, что существенным образом влияет на сопротивление насадки. Далее, имеется очень мало данных о сопротивлении орошаемых насадок, особенно при больших плотностях орошения. Почти совершенно не освещен вопрос о сопротивлении хордовых насадок. Работы отдельных авторов не систематизированы. До сего времени не предложен достаточно удовлетворительный общий метод расчета сопротивления скрубберных насадок.

Подавляющее большинство работ выполнено в лабораторных колоннах малого диаметра. Опыты проводились без соблюдения условий подобия; поэтому результаты, полученные в лабораторных

условиях в скрубберах и колоннах малого диаметра, не могут быть перенесены на большие производственные агрегаты.

Наименее изученными являются вопросы «захлебывания» скрубберов и изменения свободного объема насадки в зависимости от интенсивности орошения.

Мы в своем исследовании старались избежать вышеупомянутых недочетов и ставили перед собой задачу комплексного изучения всех вопросов, связанных с гидродинамикой скрубберного процесса. Исходя из этой задачи, и был решен вопрос о выборе метода исследования и характера лабораторной установки.

В качестве метода исследования нами был принят метод моделей.

Теория моделирования выводит условия, при которых движение жидкости в модели будет подобным движению жидкости в образце. Необходимыми и достаточными условиями являются:

- 1) геометрическое подобие модели,
- 2) подобие входа жидкости в модель,
- 3) подобие физических параметров (постоянство отношений плотности и вязкости в сходственных точках модели и образца) и
- 4) одинаковость в сходственных сечениях образца и модели определяющего критерия Рейнольдса ($Re' = Re''$).

Следствием выполнения всех этих условий является равенство второго определяемого критерия Эйлера:

$$Eu' = Eu''$$

или

$$\frac{\Delta P'}{\rho' w_1^2} = \frac{\Delta P''}{\rho'' w_2^2},$$

где $\Delta P'$ и $\Delta P''$ — перепад давления (гидравлическое сопротивление) на сходственных участках образца и модели ($kg/m^2 = mm$ в. с.). Последнее позволяет нам по найденному значению критерия Эйлера для модели (Eu'') найти гидравлическое сопротивление $\Delta P'$ образца, а именно:

$$\Delta P' = Eu'' \rho' w_1^2$$

или

$$\Delta P' = \Delta P'' \frac{\rho' w_1^2}{\rho'' w_2^2}.$$

Эти условия были соблюдены нами при моделировании скрубберного процесса в лабораторных условиях.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Для исследования гидродинамики скрубберного процесса нами применялись две установки — большая и малая. Большая установка состояла из стального скруббера диаметром 305 мм (сечение

Большая лабораторная установка

На рис. 20 представлена схема большой лабораторной установки, а на рис. 21 — схематический чертеж опытного скруббера с указанием основных размеров. Скруббер был изготовлен из 12-дюймовой трубы. Общая высота скруббера составляла 4100 мм. В верхнюю крышку, присоединяемую к скрубберу с помощью фланцев и болтов, была вварена 2-дюймовая труба для подачи воды на орошение, оканчивающаяся оросительным устройством. В сферическом днище оросителя имелось 61 отверстие диаметром по 5 мм. Верхняя крышка была сделана съемной для осуществления загрузки скруббера насадкой. Нижняя часть скруббера являлась промежуточным водосборником. Постоянный уровень воды во время опытов служил гидравлическим затвором, предотвращающим выход воздуха через водоотводную трубу. Наблюдение за уровнем воды осуществлялось с помощью водомерного стекла, а постоянство уровня достигалось путем регулировки выпуска воды вентилем на водоотводной трубе. Нижняя часть скруббера была сделана разъемной для осуществления выгрузки насадки. На уровне нижнего фланцевого соединения внутри скруббера помещалась колосниковая решетка, на которой располагалась насадка. Высота слоя насадки составляла 3000 мм.

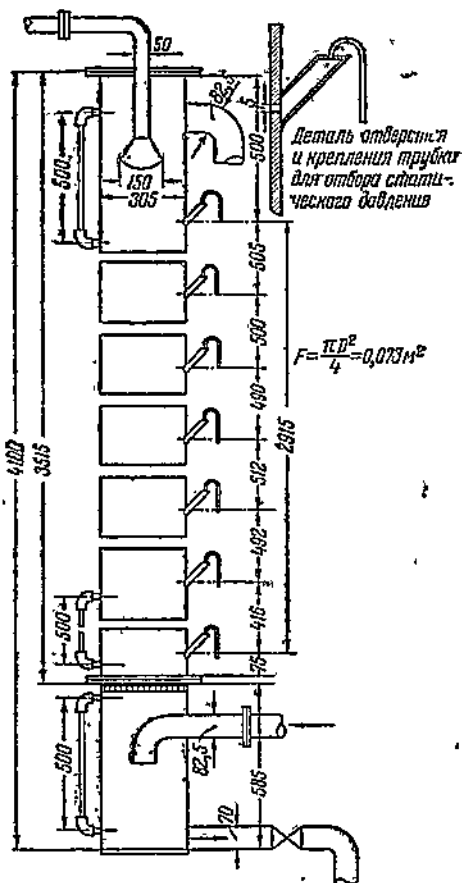


Рис. 21. Опытный скруббер (схематический чертеж).

Для подачи воздуха и выхода воды из скруббера служили приваренные к стенке скруббера патрубки, соединенные с соответствующими трубопроводами.

Воздух, проходя через насадку снизу вверх, выходил через отводную трубу в верхней части скруббера.

Для замера падения давления в насадке по высоте скруббера в боковой стенке, начиная с нижнего фланца, было высверлено 7 отверстий диаметром по 5 мм на расстоянии около 500 мм друг от

друга. В местах отверстий к стенке скруббера были приварены дюймовые наклонные трубки, соединенные с брызгоуловителями, которые в свою очередь соединялись с помощью резиновых трубок и стеклянного коллектора с дифференциальными манометрами.

При загрузке насадки в скруббер верхняя крышка отнималась, скруббер наполнялся водой и насадка засыпалась через верхнее отверстие. Решетчатая насадка загружалась в скруббер путем укладки накрест и параллельно. При загрузке накрест рейки соседних решеток находились под углом 90° . При загрузке параллельно в насадке получались сплошные каналы постоянного сечения по всей высоте. Во избежание сдвига и перекоса решеток во время работы при параллельной укладке решетки нанизывались на две направляющих рейки по длине, равной высоте слоя насадки. Для подачи воздуха в скруббер служила ротационная воздуходувка производительностью $300 \text{ м}^3/\text{час}$ с напором до $0,6 \text{ атм}$. Для подачи воды на скруббер был установлен центробежный одноколесный насос производительностью до $30 \text{ м}^3/\text{час}$.

Замер количества воздуха, поступающего в скруббер, производился при помощи нормальной диафрагмы, соединенной с дифференциальным водяным манометром (диаметр диафрагмы 35 мм , диаметр трубопровода, 81 мм). Давление воздуха до диафрагмы замерялось ртутным U-образным манометром. Температура воздуха перед диафрагмой замерялась с помощью термометра, установленного в отверстии, высверленном в трубе.

Температура воздуха перед диафрагмой в процессе работы несколько повышалась, доходя к концу опыта иногда до 40°C .

Калибровка диафрагмы производилась по углекислому. Для этого до диафрагмы к воздуху примешивалась углекислота, количество которой замерялось точно откалиброванным реометром.

После диафрагмы отбиралась проба воздуха и производился анализ на содержание в нем CO_2 . По данным анализа и расходу CO_2 (по показанию реометра) подсчитывалось количество поступающего в скруббер воздуха. Полученные результаты хорошо совпадали с данными о расходе воздуха, вычисленными по уравнению

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}},$$

где Q — расход воздуха в $\text{м}^3/\text{час}$;

α — коэффициент истечения;

g — ускорение силы тяжести;

h — показание дифманометра в мм вод. столба .

На основании данных калибровки и расчета была составлена номограмма, с помощью которой определялся по показаниям дифманометра расход воздуха при различных температурах (рис. 22).

Непосредственно перед входом воздуха в нижнюю часть скруббера был установлен второй термометр, с помощью которого измерялась температура воздуха перед скруббером. Температура воздуха на входе в скруббер вследствие охлаждения на участке трубопровода после диафрагмы всегда была практически постоянна и соответствовала приблизительно 20°C . Регулирование количества воздуха, подаваемого в скруббер, осуществлялось вентилем, помощью которого часть воздуха из трубопровода выпускалась в атмосферу; в случае очень малых подач воздуха на скруббер количество подаваемого воздуха уменьшалось еще при помощи прикрытия крана на выхлопной трубе для воздуха.

Таким образом, удавалось изменять подачу воздуха на скруббер в пределах от 30 до $300 \text{ м}^3/\text{час}$, что соответствовало линейной скорости воздуха, считая на сечение пустого скруббера от 0,15 до 1,1 м/сек.

Для замера количества воды, подаваемой на скруббер, служила также нормальная диафрагма с двумя дифференциальными ртутными манометрами, причем один из этих манометров был включен постоянно и служил для замера расхода воды при больших орошениях; второй манометр (наклонный) типа Креля, дающий более точные отсчеты перепада давления, включался лишь при малых орошениях. Градуирование водяной диафрагмы производилось по времени наполнения сосуда известной емкости. Во всех случаях мы расход воды на орошение скруббера выражаем в м^3 воды на 1 м^2 общего сечения скруббера в час.

По данным градуировки были составлены кривые расхода в зависимости от показания дифманометров, с помощью которых определялся расход воды во время опытов.

Измерение падения давления воздуха при движении его в скруббере снизу вверх осуществлялось 6 дифманометрами, выведенными на специальный контрольный щит. С помощью их за-

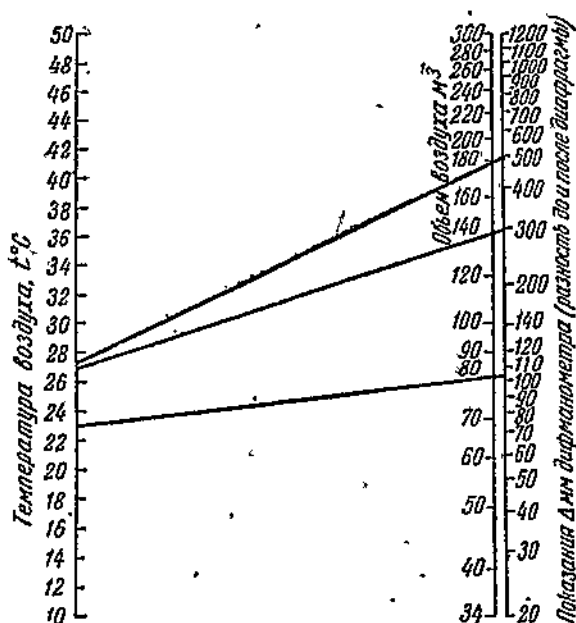


Рис. 22. Номограмма расхода воздуха через диафрагму.

мерялась потеря напора как на всю высоту слоя загруженной насадки, так и на отдельных участках по высоте через каждые 500 мм.

Наличие брызгоуловителей предотвращало перекидывание воды в манометры при больших орошениях.

Для некоторых насадок перепад давления при прохождении воздуха через скруббер был очень мал (ниже 1 мм в. с.). В этих случаях для измерения перепада давления применялся двухжидкостный манометр-мультипликатор. В качестве заполняющих жидкостей служили керосин с удельным весом 0,842 и водный раствор этилового спирта с удельным весом 0,886. Наблюдаемые показания мультипликатора были в 20 раз больше истинной разности давления, измеренной в мм в. с., согласно уравнению

$$\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} = \frac{0,886 - 0,842}{0,886} = \frac{1}{20} \text{ мм в. с.}$$

Для более точного промера сопротивления сухих (неорошаемых) насадок при малых скоростях воздуха был применен микроманометр типа «Аскания», позволяющий производить отсчет с точностью до 0,01 мм водяного столба.

Для орошения скруббера вода засасывалась из бетонного резервуара, расположенного ниже скруббера. По выходе из скруббера вода через трубу, снабженную задвижкой попадала снова в бетонный резервуар. Таким образом, одно и то же количество воды служило в качестве циркулирующей жидкости в течение нескольких дней, и температура ее обычно соответствовала температуре помещения, т. е. 17—18°C. Замер температуры воды производился периодически — несколько раз в течение опыта.

Скруббер имел, кроме нижнего водомерного стекла, еще два водоуказательных стекла: первое в верхней части и второе непосредственно над колосниковой решеткой. По этим стеклам фиксировалось начало захлебывания скруббера.

При небольших орошениях как верхнее, так и нижнее стекла были свободны от воды; однако, по мере увеличения интенсивности орошения в насадке скруббера начинало накапливаться значительное количество воды, сопровождающееся сильным бурлением и подбрасыванием воды вверх. Мы условно назвали началом захлебывания момент появления всплесков воды в нижнем или верхнем стекле и выбрасывания брызг через выпускную трубу для воздуха.

Полное захлебывание сопровождается резким повышением сопротивления, сильным бурлением и вспениванием воды в стеклах, а также интенсивным выбрасыванием воды из трубы для выхода воздуха.

Внешний вид установки показан на рис. 23.

В позднейших опытах установка была модернизирована и рекон-

струирована в направлении использования ее одновременно для исследования гидродинамики скрубберного процесса и абсорбции углекислоты водой из смесей ее с воздухом. Установка была приспособлена для работы как при атмосферном давлении, так и при повышенных давлениях до 6 *ата*.

Для этой цели был установлен компрессор производительностью 150 $\text{м}^3/\text{час}$ на давление 7 атмосфер с холодильником трубчатого типа. С помощью системы вентиля установка могла включаться в работу на воздухоудвке или на компрессоре.

Внешний вид и компоновка аппаратуры установки показаны на рис. 24, 25 и 26.

Контрольный щит установки показан на рис. 27.

Методика проведения опытов

При определении сопротивления сухой (неорошаемой) насадки задвижка для выхода воды из скруббера закрывалась для предотвращения пропуска воздуха; в нижней части скруббера оставался гидравлический затвор. Далее включалась воздухоудвка, при помощи регулирующего вентиля устанавливалась соответствующая скорость воздуха в скруббере и отмечались давление и температура воздуха перед диафрагмой, температура воздуха перед скруббером и, наконец, показания всех манометров на контрольном щите. Затем увеличивалась подача воздуха на скруббер и снова отмечались показания приборов и т. д. Для каждого типа насадки проводилось 7—10 замеров падения напора при различных скоростях воздуха в интервале от 0,15 до 1,2 м/сек (считая на полное сечение скруббера). При отсутствии циркуляции воды показания всех приборов устанавливались сразу; резких колебаний в процессе замера не замечалось.

Наличие нескольких точек замера давления по высоте скруббера давало возможность определить потерю давления в различных участках высоты насадки. Зафиксированные в опытах данные о потере напора на различных участках и по всей высоте скруббера пересчитывались на 1 м высоты слоя насадки. При этом ока-

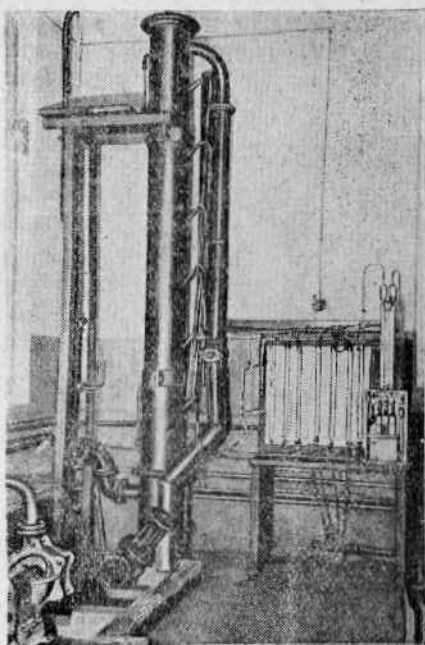


Рис. 23. Внешний вид опытного скруббера.

залось, что потеря напора на 1 м высоты на различных участках по высоте оказалась одинаковой. Это свидетельствовало о том, что поток в скруббере был стабилизирован по всей высоте насадки.

При определении сопротивления орошаемой насадки вначале включался насос и затем воздуходувка. Путем регулирования задвижек на нагнетательных линиях газа и жидкости устанавливалась

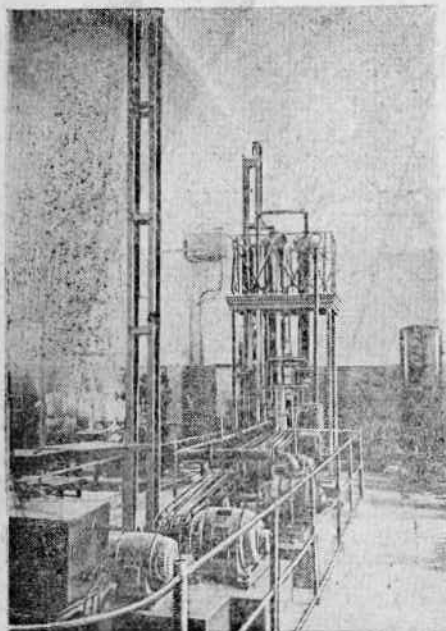


Рис. 24. Внешний вид модифицированной скрубберной установки.

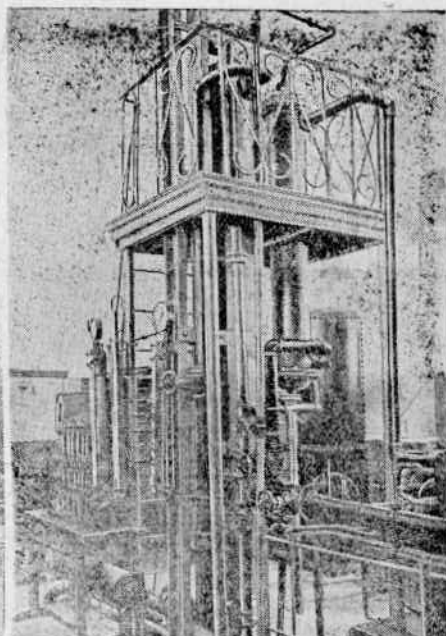


Рис. 25. Внешний вид опытного скруббера, коммуникации и щита контрольно-измерительных приборов.

определенная интенсивность орошения и скорость воздуха. После того, как по прошествии 10—15 минут достигался спокойный режим работы, фиксировались показания приборов. Затем при сохранении постоянной интенсивности орошения увеличивалась скорость воздуха, и после установления спокойного режима работы снова фиксировались показания приборов. В процессе опыта, при постоянной плотности орошения, скорость воздуха увеличивалась таким образом постепенно до тех пор, пока не наступало захлебывание скруббера. После этого опыт прекращался; затем устанавливалась новая интенсивность орошения и снова измерялась величина сопротивления насадки при различных скоростях воздуха вплоть до захлебывания

и т. д. По данным замера строились график зависимости сопротивления на 1 м высоты слоя, как функция скорости воздуха для каждой насадки, и график предельных плотностей орошения, соответствующих захлебыванию в зависимости от скорости воздуха.

Определение количества жидкости, находящейся в насадке скруббера при различных плотностях орошения, осуществлялось путем мгновенной отсечки подачи жидкости и измерения объема

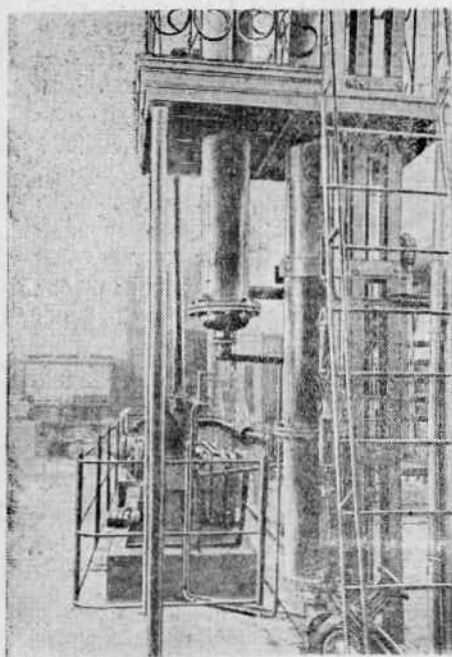


Рис. 26. Внешний вид опытного скруббера и коммуникации.

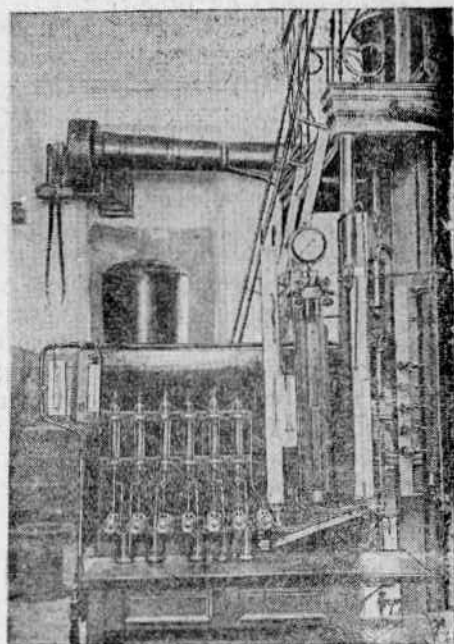


Рис. 27. Щит контрольно-измерительных приборов.

жидкости, стекающей с насадки. Мгновенная отсечка подачи жидкости достигалась быстрым закрытием вентиля на нагнетательной водяной магистрали и остановкой насоса. Одновременно закрывалась задвижка на линии выхода воды из скруббера и останавливалась воздуходувка. При этом уровень воды в нижней части скруббера поднимался выше установленной черты на водомерном стекле. Через 10 минут после остановки насоса вода из нижней части скруббера выпускалась до постоянной отметки на водомерном стекле в мерный бачок. Стеkanie жидкости с насадки происходило довольно медленно. Несмотря на то, что за 10 минут из насадки стекала основная масса жидкости, некоторое количество ее продолжало оставаться на

поверхности насадки. Поэтому для каждого типа насадки было проведено несколько промеров количества жидкости, стекающей за 16 часов (до полного прекращения стекания). Разница между количеством жидкости, собранной за 16 часов и за 10 минут, представляла собой положительную поправку, которая в последующих опытах с данной насадкой прибавлялась к количеству жидкости, собранной за 10 минут. Эта положительная поправка была меньше для регулярно загруженной насадки и решеток, т. е. для насадок, в которых преобладающей является вертикальная поверхность.

Было замечено также, что при определении количества жидкости, заполняющей насадку, необходимо вводить еще вторую поправку на дополнительное стекание жидкости по инерции (после отсечки подачи) из разбрызгивателя и нагнетательной линии. Это дополнительное количество жидкости представляло собой отрицательную поправку, которая вычиталась из измеренного объема жидкости, стекающей с насадки. Она не зависела от типа насадки и, являясь функцией интенсивности орошения, возрастала с повышением последней. В приведенных ниже результатах экспериментального исследования количества жидкости, удерживаемой насадкой при различных условиях работы скруббера, учтены обе эти поправки. Наличие в насадке во время работы скруббера жидкости приводит к уменьшению свободного объема насадки.

Обработка экспериментальных данных сводилась к построению для каждого типа насадки графиков зависимости количества удерживаемой насадкой жидкости и изменения свободного объема насадки от интенсивности орошения, как без противотока воздуха, так и при подаче в скруббер воздуха с различной скоростью. Свободный объем насадки скруббера при работе с циркуляцией жидкости вычислялся по формуле:

$$V_{св} = \frac{V_n - (V_k + V_{зап.})}{V_n} \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где V_n — объем части скруббера, занятый насадкой;

V_k — объем, занимаемый материалом насадки;

$V_{зап.}$ — объем жидкости, заполняющей насадку.

Малая лабораторная установка

Малая установка состояла из стеклянного скруббера диаметром 65 мм и общей высотой 1500 мм. Скруббер загружался 15-миллиметровыми керамическими кольцами Рашига. Высота слоя загружаемой насадки во всех случаях составляла 900 мм. Кроме того, в этом скруббере были проведены опыты по определению сопротивления сухой (неорошаемой) насадки из кусочков аммиачного катализатора и катализатора в виде таблеток (катализаторы серно-

кислотный и конверсии окиси углерода). Для замера потери напора скруббер имел три отверстия в боковой стенке: одно непосредственно над колосниковой решеткой; второе — на уровне середины слоя насадки и третье — в верхней части на уровне выхода газового потока из насадки. Эти отверстия отводными трубами соединялись с системой дифманометров, которыми фиксировалось падение напора газа, движущегося в насадке непосредственно у стенок скруббера. Кроме того, с противоположной стороны в стенке скруббера на том же уровне было сделано еще три отверстия, в которые с помощью резиновых пробок вставлялись тонкие трубочки, доходящие своими концами до осевой линии скруббера. Эти трубочки также соединялись с системой дифманометров, которыми фиксировалось падение напора газового потока, движущегося в середине насадки по осевой линии скруббера. Как показали опыты, для 15-миллиметровых колец Рашига разница в падении напора, замеренного непосредственно у стенки скруббера и по осевой линии, не велика и составляет 10—15%. Эта разница объясняется неравномерным распределением насадки по сечению скруббера (влияние стенки) вследствие очень большого отношения $\frac{d}{D}$. В опытах с более мелкой насадкой (катализаторы) разницы в потере напора, измеренной у стенки скруббера и по осевой линии, не обнаружено. Это свидетельствует о том, что при достаточно малых отношениях $\frac{d}{D}$ (меньше 0,1) в насадке (в отличие от движения потока в круглых трубах) средняя скорость потока по поперечному сечению скруббера одинакова.

Принципиальная схема малой лабораторной установки в основном была та же, что и большой.

Орошающая жидкость поступала в скруббер из напорного бачка с постоянным уровнем. Выходящая из скруббера жидкость собиралась в приемный бак, оттуда насосом снова нагнеталась в напорный бачок.

Регулирование количества орошающей жидкости осуществлялось с помощью большого стеклянного крана.

Измерение количества воздуха осуществлялось с помощью откалиброванных стеклянных реометров.

В качестве орошающих жидкостей в опытах с 15-миллиметровыми керамическими кольцами Рашига были применены следующие:

Жидкость	Уд. вес в г/см ³	Вязкость в сантипу- азах
Соляровое масло	0,875	370,00
Водный раствор глицерина	1,248	484,3
То же	1,21	74,78
То же	1,13	6,80
Водный раствор соды	1,13	2,05
Вода	1,00	1,00

Малые размеры скруббера позволили провести определение сопротивления сухих насадок при скоростях воздуха до 3 м/сек. (считая на сечение пустого скруббера) и тем самым дополнить данные, полученные на большом скруббере, где максимальная скорость воздуха составляла 1—1,1 м/сек.

При проведении опытов в малом стеклянном скруббере было отмечено следующее явление. При скорости воздуха в 2,3 м/сек верхний слой сернокислотного катализатора поднимался и находился как бы во взвешенном состоянии. При скорости в 2,7 м/сек во взвешенном «кипящем» состоянии находился уже весь слой катализатора высотой в 0,9 м и наблюдался унос отдельных таблеток из скруббера вместе с воздухом. Вынос отдельных кусочков катализатора синтеза аммиака из скруббера имел место при скорости воздуха в 2,3 м/сек. Практический вывод из этого наблюдения тот, что в каталитических процессах, осуществляемых при больших скоростях газового потока с применением кускового катализатора, газовый поток должен во избежание выноса катализатора направляться сверху вниз с тем, чтобы прижимать катализатор к колосниковой решетке.

Методика проведения опытов на малой установке была та же, что и на большой. Стеклянные стенки скруббера позволяли весьма наглядно наблюдать процесс подвигания жидкости в насадке и фиксировать момент начала захлебывания и полного захлебывания. Схема опытной установки, состоящей из скруббера с диаметром в 104 мм, и методика проведения опытов были аналогичны вышеизложенным.

Опыты по «захлебыванию» скрубберов водной очистки коксового газа от CO_2 на одном из азотно-туковых заводов были проведены в 1938 г. в период опробования системы на воздухе перед пуском завода в эксплуатацию. Опыты проводились на скруббере с диаметром 2000 мм с системой воздух—вода под давлением около 13 ат. Скруббер был загружен 35-миллиметровыми железными кольцами Рашига. В процессе опытов фиксировались точки начала захлебывания, соответствующие выбрасыванию струй жидкости из скруббера через выпускные трубы для газа (результаты опытов см. ниже).

3. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К СКРУББЕРНОМУ ПРОЦЕССУ

Закон сопротивления при движении жидкости в гладких трубах

Скруббер по своей конструкции представляет собой трубопровод, заполненный насадкой; следовательно, основные законы движения жидкостей в трубах могут рассматриваться как отправная точка для разработки основ гидродинамики скрубберного процесса. Слово «жидкость» в гидравлике применяется в широком смысле, включающем капельные и упругие жидкости (газы, пары). Известно,

что, если скорость движения сжимаемой жидкости (газа) мала по сравнению со скоростью звука, то при решении практических задач можно принимать жидкость несжимаемой. В производственных условиях движение газов в трубопроводах, каналах, скрубберах и пр. осуществляется при скоростях, далеких от скорости звука, поэтому движение газа в этих случаях рассматривается как движение несжимаемой жидкости.

В истории гидравлики большое место занимают исследования, имевшие целью нахождение закона сопротивления для течения в трубах. Результаты этих исследований, длившихся десятилетиями, оказались чрезвычайно пестрыми не только в отношении формы закона, т. е. функции, в которой входят в закон различные независимые переменные, но и в отношении выбора этих переменных.

Только после того, как при исследованиях стали пользоваться соображениями о подобии, удалось критически подойти к этому выбору. Новейшие теоретические и экспериментальные исследования этого вопроса (например, работы Шиллера⁶⁴, Никурадзе⁶⁵ и др.) проведены исключительно на основе принципа подобия.

Следует подчеркнуть, что соображения о подобии могут дать только общую форму закона сопротивления, но ни в коем случае не окончательное его выражение (вплоть до числовых коэффициентов). Тем не менее применение этого способа оказалось чрезвычайно плодотворным, во-первых, потому, что таким путем сразу же выяснилась несостоятельность многих ранее открытых законов сопротивления и, во-вторых, вследствие преимущества и удобства обобщения экспериментальных данных. Говоря о сопротивлении, которое испытывает текущая в трубе жидкость, обладающая трением, со стороны стенок трубы, следует предварительно условиться о форме, в какой будем выражать это сопротивление. В русской, американской и немецкой литературе пользуются почти исключительно понятием «падение давления» или «потеря напора» на единицу длины трубы, имеющим размерность $кг/м^2$ или $мм$ водяного столба. В технической литературе пользуются также понятием «потери высоты давления». При этом под «высотой давления» понимается величина

$$h = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\rho g},$$

имеющая размерность высоты столба жидкости в метрах.

В английской литературе под сопротивлением трубы понимают часто сопротивление трения на единицу поверхности трубы и обозначают его буквой R или F .

Мы в дальнейшем будем пользоваться первым способом выражения сопротивления.

Возможность обобщения результатов гидродинамического исследования процессов движения жидкости в трубопроводах на

основе теории подобия впервые была доказана Осборном Рейнольдсом, заслугой которого является создание научной «гидродинамики трубопроводов» и теории моделей в гидро- и аэродинамике. Пользуясь методом механического подобия (в основе известным из работ Ньютона), Рейнольдс путем рассмотрения подобно протекающих потоков доказал, что режим движения жидкости в трубопроводе обусловлен не исключительно абсолютной величиной скорости течения, размерами и материалом трубопровода, как полагали большинство гидравликов того времени, а некоторым безразмерным, состоящим из совокупности факторов критерием, комплексным параметром:

$$Re = \frac{\bar{w} d \rho}{\eta} = \frac{w d}{\nu},$$

где $\bar{w}$ — средняя скорость текущей жидкости в м/сек;
 d — диаметр трубопровода в м;
 ν — кинематический коэффициент вязкости в м²/сек.

Названное впоследствии именем Рейнольдса характеристическое число — параметр Re является прямым следствием рассмотрения механически подобно протекающих потоков для напряжений, возникающих в вязкой жидкости, исходя из обычных уравнений классической гидродинамики (Навье-Стокса), без учета внешних сил, действующих на поток.

Условие механического (динамического) подобия заключается в требовании полного совпадения динамики процесса рассматриваемых движений с учетом влияния сил инерции и вязкости; уравнения движения двух геометрически подобных потоков должны совпадать, и числовые коэффициенты, входящие в эти уравнения, могут отличаться лишь своим масштабом. При этом, конечно, обязательно наличие геометрического подобия — сходственности линий тока на всем протяжении обоих потоков и состояния стенок трубопровода. Однако, одного соблюдения условия геометрического подобия недостаточно для динамического подобия; ограничительные условия, налагаемые последними, приводят к необходимости для сравниваемых потоков следующих соотношений:

$$\frac{\bar{w} d}{\nu} = Re = idem$$

и

$$\frac{\Delta P}{\rho \bar{w}^2} = Eu = idem,$$

где символ $idem$ — в отличие от символа $const$ — означает одинаковые гидравлические условия в пространственном смысле, а не во времени.

Критерий Рейнольдса представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости, т. е. $\rho \frac{dw}{d\tau} : \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ и дает возможность определить характер течения жидкости.

Опыты Рейнольдса (1883 г.) так же, как и опыты Гагена (1841 г.), установили следующее:

а) поток жидкости в трубопроводе может быть двоякого типа: во-первых, параллельно продольно-струйчатого, незавихренного — ламинарного и, во-вторых, беспорядочно завихренного, криволинейного — турбулентного;

б) переход от ламинарного к турбулентному характеру движения происходит для одной и той же трубы в одной и той же жидкости при определенной скорости, названной критической.

Многочисленными опытами было доказано, что движение жидкости в гладких трубах при скорости ниже критической подчиняется закону Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{32 \mu l w}{d^2}, \quad (14)$$

где ΔP — потеря напора в кг/м²;

l — длина трубопровода в м;

w — средняя скорость жидкости в м/сек;

d — внутренний диаметр трубы в м;

μ — коэффициент вязкости в кг сек/м²;

Рейнольдс в своих классических опытах обнаружил, что при достижении критического значения числа Re ламинарное движение уступает место турбулентному. Значение $Re_{кр}$, отвечающее нарушению закона Пуазейля и переходу из ламинарного в турбулентное течение, лежит в пределах от 2000 до 3000. Согласно опытным данным Шиллера, в последнее время принято за величину $Re_{кр}$ при движении жидкости в гладких трубах считать 2320.

В действительности, как показали позднейшие исследования, один режим движения не переходит мгновенно, сразу в другой: режим потока вблизи критической области неустойчив и иногда является промежуточным между ламинарным и турбулентным.

Для турбулентного режима наиболее простым уравнением показательного типа, выражающим потерю напора, является общепринятое в гидравлике уравнение Дарси-Вейсбаха, называемое в американской литературе уравнением Фаннинга:

$$\Delta P = \frac{f \gamma w^2 l}{2 g m} = \frac{2 f \gamma w^2 l}{g d} = \frac{2 f \rho w^2 l}{d}, \quad (15)$$

где ΔP — фрикционная потеря напора в кг/м²;

f — безразмерный коэффициент трения;

l и d — длина и диаметр трубопровода в м;
 m — гидравлический радиус в м, равный площади поперечного сечения в м^2 , деленной на смоченный параметр:
 для круглых труб $m = \frac{d}{4}$;

w — средняя скорость движения в м/сек;

γ — удельный вес жидкости в $\text{кг}/\text{м}^3$;

g — ускорение силы тяжести — $9,81 \text{ м}/\text{сек}^2$;

ρ — плотность в $\text{кг.сек}^2/\text{м}^4$.

Это уравнение в литературе часто приводится в следующем виде:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot \frac{l}{d} = \lambda \cdot \frac{\gamma w^2}{2g} \cdot \frac{l}{d}, \quad (16)$$

где λ — коэффициент трения.

При движении в трубе не круглого сечения в уравнения (15) и (16) вместо диаметра трубы подставляется гидравлический радиус m или эквивалентный диаметр $d_e = 4m$.

В случае, если жидкость движется с критической скоростью, уравнение (14) можно приравнять уравнению (15) и таким образом определить значение критической скорости

$$w_{кр} = \frac{16 \mu}{f \rho d}. \quad (17)$$

Уравнение (15) является универсальным и пригодно как для турбулентного режима, так и для ламинарного. В последнем случае величина f приравнивается выражению: $f = \frac{16}{Re}$, как это следует из уравнения (17).

В применении этих формул для турбулентного режима движения наибольшие затруднения встречаются в определении коэффициента трения f или λ .

Для определения значения f и λ для частных случаев движения жидкости предложено несколько формул. Известны эмпирические формулы Дарси, Лянга, Биля, Мизеса, Фламана и Блаузиуса и др.

Для вычисления коэффициента λ кратного f для гладких труб, широко применяется формула Блаузиуса:

$$\lambda = 4 f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (18)$$

На основании опытов Стантона и Паннелла, Лис⁶⁶ получил формулу следующего вида:

$$\lambda = 0,0072 + \frac{0,6104}{Re^{0,35}}. \quad (19)$$

Опыты Якоба и Эрка⁶⁷, совпадающие с результатами опытов Стантона и Паннелла, показали, что довольно хорошее сходжение с точностью до $\pm 1,0\%$ дает формула:

$$\lambda = 0,00357 + 0,2395 Re^{-0,35} . \quad (20)$$

В последнее время Шиллер и Герман⁶⁸, базируясь на своих опытах и результатах обширных исследований Никурадзе⁶⁵, предложили следующую приближенную формулу:

$$\lambda = 0,0027 + 0,161 Re^{-0,3} . \quad (21)$$

Никурадзе преобразовал формулу Шиллера и дал ей следующий вид:

$$\lambda = 0,0054 + 0,396 Re^{-0,3} . \quad (22)$$

Все вышеприведенные формулы дают приблизительно совпадающие результаты до значений $Re=1 \cdot 10^8$. Для значений $Re > 1 \cdot 10^8$ Никурадзе получил:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 Re^{-0,237} . \quad (23)$$

Если выразить графическим способом зависимость между f и $Re = \frac{dw\rho}{\mu}$, то в результате в логарифмических координатах получается ломаная линия с переломом в точке, соответствующей критической скорости; верхняя часть кривой направлена под углом 45° и выражает собой закон Гагена-Пуазейля, а нижняя, направленная под небольшим уклоном к оси абсцисс, позволяет установить зависимость значения f от $Re = \frac{dw\rho}{\mu}$ в области турбулентного движения и выражает собой закон Блаузиуса при течении в гладких трубах.

В практических условиях скорости течения в трубопроводах всегда выше критических скоростей и ламинарный режим в технических трубопроводах встречается крайне редко. В этом заключается причина, почему до Гагена и Рейнольдса никому из многих экспериментаторов не удалось опытным путем установить различие в законах ламинарного и турбулентного режимов. Пуазейль изучал потоки в капиллярных трубках и не проводил опытов с большими скоростями. В опытах же с трубами больших диаметров не велось наблюдений над режимом потока при весьма малых скоростях, не имеющих практического значения для технических трубопроводов.

Влияние шероховатости на сопротивление

Приведенная выше зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса (закон Блаузиуса) действительна лишь для гладких труб.

На практике приходится иметь дело по большей части не с гладкими, а с шероховатыми стенками труб; более того, во время эксплуатации трубы меняют свою шероховатость от появления на поверхности ржавчины, различных осадков и т. п. Движение в шероховатых трубах отличается значительной сложностью и изучено сравнительно мало. Результаты опытов с шероховатыми трубами долгое время не поддавались обобщению ввиду больших расхождений в полученных опытных данных. Лишь в недавнее время в результате опытов Шиллера⁶⁴, Гопфа и Фромма⁶⁹ и в особенности Никурадзе⁷⁰ удалось выявить закономерность в расположении точек, характеризующих графически данные экспериментов. Эта закономерность дала возможность установить формулы, учитывающие влияние шероховатости. Коэффициент сопротивления шероховатых труб зависит не только от числа Рейнольдса, но также от формы и величины выступов, образующих собой шероховатость.

Переходя к характеристике сопротивления и режима потока в шероховатых трубах, необходимо предварительно установить самое понятие о шероховатости, условиться о масштабе ее и критерии оценки.

В последнее время принято характеризовать шероховатость отношением средней абсолютной высоты неровностей (выступов) стенок трубы K к внутреннему диаметру трубы D , т. е. степенью относительной геометрической шероховатости — $\frac{K}{D}$.

По Гопфу и Фромму можно различать два типа шероховатости:

1. Острые и коротковолновые неровности. Примером этого типа шероховатости, называемой иногда угловатой или зернистой, могут служить цементные и чугунные поверхности, а также стенки из заржавленного железа.

2. Волнистую шероховатость, примерами которой могут являться строганное дерево, асфальтированное листовое железо.

Коэффициент сопротивления труб с волнистой шероховатостью при турбулентном течении пропорционален $Re^{-0,25}$. Поэтому линия зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса в логарифмических координатах параллельна кривой Блаузиуса, но расположена выше ее. При этом сопротивление тем больше, чем больше отношение $\frac{K}{D}$.

Трубы с шероховатостью первого типа (зернистая шероховатость) в турбулентной области характеризуются законом $\lambda = \text{const}$, т. е. независимостью коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса; при этом падение давления в трубе пропорционально квадрату скорости (квадратичный закон сопротивления). Величина константы тем больше, чем больше относительная шероховатость.

Опыты Никурадзе с трубами различной шероховатости показали, что в ламинарной области экспериментальные точки ложатся на кривую Гаген-Пуазейля. В турбулентной области каждой величине относительной шероховатости отвечает закон $\lambda = \text{const}$.

При этом до перехода на горизонтальную кривую точки ложатся на кривую Блаузиуса. Число Рейнольдса, отвечающее переходу от закона Блаузиуса к квадратичному закону, тем больше, чем меньше относительная шероховатость.

Независимость λ от числа Рейнольдса является одним из признаков автомодельности.

Возрастание сопротивления с увеличением шероховатости стенок при одном и том же значении Re объясняется тем, что большая или меньшая степень шероховатости обуславливает при том же Re большую или меньшую интенсивность вихреобразования в потоке и прогрессирующее до некоторого предела для данной степени относительной шероховатости развитие турбулентности его.

При скоростях ниже критической, при потоке с ламинарным режимом движения, в котором интенсивность вихреобразования равна нулю, происходит плавное обтекание неровностей стенок и не происходит срыва струй с острых выступов стенок.

При скоростях же выше критической, при турбулентном режиме потока срыв струй имеет место и последние образуют вихревые кольца. Скорость вблизи стенок мала и поэтому вихревое кольцо при срыве с острого выступа обладает незначительным запасом количества движения (живой силы, кинетической энергии). При передвижении сорвавшегося кольца в ядро течения, обладающего более значительной скоростью, скорость вихревого кольца должна быть доведена до скорости ядра течения. Для этого требуется увеличение количества движения сорвавшегося кольца, что вызывает большую затрату энергии на преодоление сопротивления при передвижении потока.

Можно дать еще одно толкование опытов Никурадзе. Относительная толщина ламинарного пограничного слоя $\frac{\delta}{D}$ в трубах, согласно теории пограничного слоя Прандтля пропорциональна $Re^{-1/2}$ и очень мала. Она убывает при возрастании Re , становится исчерпывающе малой и в пределе $\lim \delta \rightarrow 0$

при $Re \rightarrow \infty$.

Поэтому трубы с малой относительной шероховатостью подчиняются закону Блаузиуса только до определенного значения числа Рейнольдса, после которого неровности стенки уже начинают выступать за пределы ламинарного пограничного слоя и закон Блаузиуса уступает место квадратичному закону. Это относится и к совершенно технически гладким трубам, ибо труба, которую можно считать гладкой при сравнительно небольших скоростях и значениях Re , становится «гидравлически шероховатой» при значительных скоростях и больших Re .

Следует также отметить, что критическое число Рейнольдса несколько меньше для шероховатых, чем для гладких труб. Следовательно, для полного динамического подобия потоков в шероховатых трубах необходимо равенство не только параметра Re , но

также полное геометрическое подобие ограничивающих поток стенок. Другими словами, в ряду линейных размеров комплексного критерия подобия следует учитывать также шероховатость стенок. Но критерий Re безразмерен, стало быть, в целях сохранения нулевой размерности для комплексного критерия подобия на основе параметра Re вводимое добавочно характеристическое число также должно быть безразмерно. Таким и является отношение $\frac{K}{D}$, характеризующее степень относительной шероховатости.

Таким образом, необходимая для гладких труб функциональная связь:

$$\lambda_{г\lambda. тр.} = \varphi(Re)$$

в случае шероховатых труб должна выразиться:

$$\lambda_{шер. тр.} = \varphi\left(Re \frac{K}{D}\right).$$

Анализ процесса движения жидкости приводит к разграничению четырех областей с различными режимами потока в зависимости от значения критерия Рейнольдса и шероховатости трубопроводов, а именно:

а) первая область — с ламинарным гаген-пуазейлевским режимом, редко осуществляемым в технической практике: $Re \leq 2320$;

б) вторая область — со слабо выраженным (прогрессирующим) характером турбулентности потока — с относительно большой толщиной пограничного слоя, почти не испытывающим влияния шероховатости трубы:

$$2320 < Re < 1000 D;$$

$$\lambda_{шер. тр.} \approx \lambda_{г\lambda. тр.} = \varphi(Re),$$

где D — диаметр трубы в мм;

в) третья область — переходная к резко выраженной турбулентности потока:

$$\lambda = \varphi\left(Re \frac{K}{D}\right);$$

г) четвертая область — с малой толщиной пограничного слоя, с резко выраженной (стабилизированной) турбулентностью потока, сопротивление которого строго подчиняется квадратичному закону (λ не зависит от значения Re) и является функцией относительной шероховатости

$$\lambda = \varphi\left(\frac{K}{D}\right).$$

Следует отметить, что это разграничение второй, третьей и четвертой областей достаточно условно. На самом деле резкой границы, вполне строгой количественной разницы между ними установить нельзя.

Вывод уравнения зависимости между потерей напора и основными факторами движения методом размерности

Получение формул, устанавливающих связь между потерей напора и основными факторами движения, безупречных в научном отношении и надежных в практическом смысле, оказалось задачей крайней сложности и наука вынуждена была пойти к ее разрешению несколькими различными методами.

Самым логичным и выдержанным с научной точки зрения методом явилось бы изучение потока путем расчленения его на отдельные составные элементы — струйки и линии тока. Начав рассмотрение с первичного бесконечно малого элемента, приложив к нему все действующие силы и применив к нему общие законы механики, получаем дифференциальное уравнение, характеризующее состояние этого элемента. Интегрирование этих элементов по длине струйки должно дать закон распределения давления, скоростей в точках, взятых вдоль струйки. Интегрирование же по поперечному сечению потока должно дать эти же величины, распространяемые на целый поток.

Такой чисто аналитический метод является всеобъемлющим и научно выдержанным. Однако, сложность решения подобными методами задачи оказалась настолько велика, что для большинства практических вопросов этот метод окончательного ответа на сегодняшний день не дает.

Сущность другого метода заключается в том, что рассматриваются не дифференциальные элементы движения жидкости, а какие-то конечные объемы. К этим конечным объемам больших или меньших поперечных размеров применяются общие законы механики и физики в виде уравнения равновесия или закона сохранения энергии. Взаимодействие отдельных частей жидкости при этом из рассмотрения выпадает, что весьма упрощает рассмотрение вопроса. Для искомых величин (скорость и давление) даются не точные аналитические выражения, характеризующие их состояние в каждой частице, а некоторые сложные величины, получаемые приближенным способом. Естественно, что этот метод, сильно упрощающий решение задачи, страдает в смысле строгости и точности получаемых решений. Этим методом в сочетании с широко применяемым в гидравлике методом экспериментального изучения вопросов и были получены приведенные выше уравнения (14) и (15) для равномерного движения жидкости, устанавливающие связь между потерей напора и основными факторами движения.

При изучении ряда вопросов гидравлики весьма плодотворные результаты дает метод размерности, предложенный Рейнольдсом и заключающийся в следующем.

Как известно, всякая физическая величина, характеризуется своей размерностью, которая отражает ее природу и ее физическую сущность. Если имеется уравнение, связывающее аналитически между собой какие-нибудь физические величины, то очевидно, что

это уравнение не просто устанавливает числовую связь между входящими в нее величинами, а по существу запечатлевает физическую сущность явления. Отсюда понятно, что такое уравнение между физическими величинами возможно только в том случае, если эти величины имеют одну и ту же размерность или, иначе выражаясь, если уравнение однородно. Как известно, из теории измерений, все единицы меры могут быть сведены к трем основным единицам, за которые обычно принимаются единицы длины, массы и времени. Следовательно, размерность любой физической величины может быть выражена через эти три основные единицы. Если какая-нибудь величина выражается через несколько основных единиц меры, то измерение в этом случае называют составным или сложным. Равенство между сложными размерностями двух физических величин предполагает также равенство между основными единицами меры, из которых составлена эта сложная размерность. Таких равенств по количеству основных единиц, очевидно, может быть три. Таким образом, если имеются две физических величины, из которых размерность одной содержит T_1 единиц времени, M_1 единиц массы и L_1 единиц длины, а размерность других содержит T_2 , M_2 и L_2 этих единиц, то равенство размерности, характеризующей эти физические величины, может быть представлено в виде следующей системы уравнений:

$$T_1 = T_2; \quad M_1 = M_2; \quad L_1 = L_2.$$

На этих трех уравнениях и основан метод размерности, дающий возможность установить аналитическую зависимость между несколькими заранее заданными физическими величинами.

В качестве примера рассмотрим ламинарный изотермический поток жидкости с постоянным расходом массы G' , в длинной вертикальной трубе постоянного диаметра.

Факторами, вполне характеризующими физическую обстановку данного потока, являются: ΔP_T , g , l , d , w и μ . Для потока в длинной трубе логично сделать допущение, что сила трения жидкости прямо пропорциональна длине трубы l .

Для примера предположим, что точно неизвестно, каким образом входят в уравнение величины d , w и μ , вследствие чего, обозначая через φ некоторые функции, предварительно пишем:

$$\Delta P_T = \varphi(d) \varphi'(w) \varphi''(\mu) l. \quad (24)$$

Это уравнение целесообразно представить в виде следующей экспоненциальной зависимости:

$$\Delta P_T = a d^b w^c \mu^d l, \quad (24a)$$

в которой безразмерные показатели a , b , c и безразмерный коэффициент пропорциональности a могут иметь любые значения.

Подставляя в уравнение (24а), вместо величин соответствующие размерности, получаем:

$$\frac{\kappa z}{M^2} = \alpha (M)^a \left(\frac{M}{\text{сек}} \right)^b \left(\frac{\kappa z \cdot \text{сек}}{M^2} \right)^c (M). \quad (25)$$

Уравнение (25) должно удовлетворять каждой из входящих в него трех основных размерностей; вследствие этого можно данное уравнение разбить на следующие три уравнения, выражающие равенство соответствующих показателей степени:

$$\begin{aligned} \sum (\kappa z) : +1 &= c; \\ \sum (M) : -2 &= a + b - 2c; \\ \sum (\text{сек}) : 0 &= -b + c. \end{aligned}$$

Решая эти три уравнения, получаем: $c = 1$; $b = 1$; $a = -2$.

Подставляя полученные численные значения показателей в уравнение (24 а), получаем:

$$\Delta P_T = \alpha d^{-2} w \mu l = \frac{\alpha w \mu l}{d^2}. \quad (26)$$

Преобразуем это уравнение следующим образом:

$$\frac{\Delta P_T d^2}{l w \mu} = \alpha. \quad (27)$$

Мы получили в левой части уравнения (27) так называемый «безразмерный комплекс», потому что размерности входящих в него величин взаимно уничтожились:

$$\frac{\Delta P_T d^2}{l w \mu} = \frac{\kappa z \cdot M^2 \text{ сек} \cdot M^2}{M^2 \cdot \text{мм} \cdot \kappa z \cdot \text{сек}} = (M)^0 (\kappa z)^0 (\text{сек})^0,$$

Уравнение (27) имеет вид закона Пуазейля. Безразмерная постоянная α , как показывает опыт, равна 32. Закон Пуазейля может быть также получен математически из определения абсолютного коэффициента вязкости, принимая дополнительно отсутствие скольжения среды у стенки.

Пи-теорема. Величина ΔP_T в левой части уравнения (24а), у которой все показатели известны, рассматривалась в отношении размерности как одна переменная. В правой же части уравнения (24а) было три переменных с неизвестными показателями. Всего, таким образом, в размерностное уравнение (24а) входило 4 переменных. Три размерности κz , M , сек достаточны для определения, всех четырех переменных. Разность между числом переменных (четыре) и числом определяющих размерностей (три) равна единице, т. е. как раз числу безразмерных комплексов, полученных в уравнении (27). Содержание так называемой «Пи-теоремы» и заклю-

чается в том, что число безразмерных комплексов n_g , получаемых согласно с теорией размерности, вообще равно разности между числом переменных n_f и числом основных размерностей n_d :

$$n_g = n_f - n_d. \quad (28)$$

В исключительных случаях n_g может быть более, чем

$$n_f - n_d.$$

Если характер движения текучей среды не струйчатый, а турбулентный, то, как известно, в дополнение к факторам, упомянутым в вышеприведенном примере, необходимо включить и плотность. Поэтому для гладких труб

$$\Delta P_T = \alpha d^a w^b \mu^c \rho^e l, \quad (29)$$

$$\frac{\kappa z}{M^2} = \alpha (M)^a \left(\frac{M}{\text{сек}} \right)^b \left(\frac{\kappa z \cdot \text{сек}}{M^2} \right)^c \left(\frac{\kappa z \cdot \text{сек}^2}{M^2} \right)^e M, \quad (30)$$

$$\sum (\kappa z) : 1 = c + e;$$

$$\sum (M) : -2 = a + b - 2c - 4e + 1;$$

$$\sum (\text{сек}) : 0 = -b + c + 2e.$$

Таким образом, имеем три характеристических уравнения с четырьмя неизвестными. Решаем их относительно трех из неизвестных, а именно a , b и e (выбор c в качестве неизвестной, через которую выражаются остальные неизвестные, сделан произвольно);

$$e = 1 - c; \quad b = 2 - c; \quad a = -1 - c.$$

Подстановка численных значений показателей в уравнение (29) приводит к следующему:

$$\Delta P_T = \alpha \frac{\rho w^2 l}{d} \left(\frac{\mu}{dw\rho} \right)^c. \quad (31)$$

Преобразуя уравнение (31), получаем

$$\frac{\Delta P_T}{\rho w^2} \cdot \frac{d}{l} = \alpha \left(\frac{\mu}{dw\rho} \right)^c. \quad (32)$$

Таким образом, независимо от первоначального допущения экспоненциального характера зависимости между различными факторами по уравнению (29), теория размерности приводит к следующей взаимозависимости между безразмерными комплексами:

$$\frac{\Delta P_T}{\rho w^2} \cdot \frac{d}{l} = \varphi \left(\frac{\mu}{dw\rho} \right), \quad (33)$$

в которой остается определить вид функции φ от безразмерного комплекса $\frac{\mu}{d\omega\rho}$. Прилагая Пи-теорему [уравнение (28)], получаем $n_0 = n_f - n_d = 5 - 3 = 2$, как оно в действительности было уже получено ранее.

Если принимается во внимание шероховатость трубы, то получают три безразмерных комплекса. Теория приводит к следующей зависимости:

$$\frac{\Delta P_T}{\rho\omega^2} \cdot \frac{d}{l} = \varphi\left(\frac{\mu}{d\omega\rho}\right)\varphi'\left(\frac{K}{d}\right), \quad (34)$$

которая нуждается в определении (из опыта) вида функций φ и φ' . Для изотермического турбулентного потока в короткой трубе, в котором ΔP_T не пропорционально l , пригодно следующее уравнение:

$$\Delta P_T = \alpha d^a \omega^b \mu^c \rho^e K^f l^h. \quad (34a)$$

Так как имеется семь неизвестных при наличии только трех размерностей, то в результате получается зависимость между четырьмя безмерными комплексами, а именно:

$$\left(\frac{\Delta P_T}{\rho\omega^2}\right)\left(\frac{d}{l}\right) = \varphi\left(\frac{\mu}{d\omega\rho}\right)\varphi'\left(\frac{K}{d}\right)\varphi''\left(\frac{l}{d}\right), \quad (35)$$

где вид функций φ , φ' и φ'' теоретически неопределим и находится экспериментальным путем.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОТЕРИ НАПОРА ГАЗА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ СУХУЮ (НЕОРОШАЕМУЮ) СКРУББЕРНУЮ НАСАДКУ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Характер движения газа в насадке скруббера

Указанные выше закономерности применимы для движения жидкости в трубах и каналах. При движении жидкости в трубе или канале не круглого сечения в уравнение вместо диаметра необходимо подставлять гидравлический радиус m или эквивалентный диаметр, равный $4m$. Как мы видели, шероховатость труб и каналов сильно усложняет характер движения жидкости в трубе. Изучению влияния шероховатости посвящены десятки работ и тем не менее для ряда практических случаев мы еще не имеем точных данных для проектирования. Вопрос еще более усложняется, когда от рассмотрения законов движения жидкостей в трубах мы переходим к изучению движения жидкостей в скрубберах и башнях, которые могут рассматриваться, как трубы, заполненные насадкой. Наличие насадки является дополнительным фактором турбулизации потока.

Практически в производственных скрубберах поток всегда турбулентный. При наличии насадки критическая скорость, при которой наступает переход из ламинарного режима в турбулентный, значительно ниже, чем в незаполненных гладких трубах. Так, по нашим данным для беспорядочно загруженной кусковой и кольцевой насадок переход из ламинарного в турбулентный режим соответствует значениям $Re = 50-60$. Лишь при очень малых скоростях (на практике не применяемых) и при очень мелкой насадке — с диаметром зерен меньше 5 мм — сохраняется ламинарный режим. Сучков⁴¹⁾ своими опытами по определению режима движения газового потока в коротких стеклянных трубках с диаметром 20 и 40 мм качественно показал, что благодаря наличию так называемой «турбулентности входа» движение газа имеет неустойчивый турбулентный характер. Таким образом, даже при правильной укладке колец Рашига в скруббер практически при движении газового потока в нем всегда имеет место турбулентный режим. Количественно это доказано нашими опытами с насадкой из правильно уложенных колец Рашига и деревянных решеток.

Как уже было указано, в качестве насадок употребляют тела правильной или неправильной геометрической формы, загружаемые внутрь скруббера засыпкой в беспорядке, или реже — геометрические элементы, уложенные правильными рядами. Таким образом, в большинстве случаев затруднительно бывает точно определить диаметр и длину каналов для прохода газа, а также истинное живое сечение, т. е. как раз те величины, которые необходимы для расчета. Движение газа в скруббере, особенно при орошении насадки жидкостью весьма сложно и потеря напора газа должна зависеть от целого ряда факторов, значение которых трудно учесть.

И тем не менее, применяя законы течения жидкости в трубах к случаю движения жидкости в скруббере, мы значительно упрощаем рассмотрение вопроса и получаем возможность разработки общего метода расчета сопротивления скрубберных насадок.

Вывод уравнения для беспорядочно загруженной насадки

Движение газа через насадку скруббера можно рассматривать как течение по параллельным каналам. Если насадка состоит из правильно уложенных элементов, образующих параллельные каналы постоянного сечения, тогда потеря напора газа при движении через насадку будет обусловлена потерей энергии на трение о поверхность каналов. В том случае, если насадка состоит из беспорядочно загруженных частиц, сечение отдельных каналов для прохода газов будет непостоянно. При этом сопротивление течению при изотермических условиях будет складываться из сопротивления от трения газового потока о поверхность частиц и местных сопротивлений, обуславливающих повышенную турбулизацию потока. Точно определить эти сопротивления в беспорядочно загруженной насадке

затруднительно, но порядок каждого из них можно оценить на основании законов течения в трубах; это имеет значение для освещения процессов абсорбции и теплопередачи, которые зависят от динамических условий течения.

Таким образом

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_{\mu},$$

где ΔP — общая потеря напора газа при движении через насадку;
 ΔP_T — потеря напора, обусловленная трением;
 ΔP_{μ} — потеря напора, обусловленная гидродинамическими или местными сопротивлениями.

По аналогии с движением в трубах, выразим потерю напора газа, обусловленную трением с помощью следующего уравнения:

$$\Delta P_T^* = \frac{f_T \bar{w}^2 \gamma l}{2 g m} \quad (36)$$

или на 1 м высоты насадки

$$\Delta P_T = \frac{f_T \gamma \bar{w}^2}{2 g m} = \frac{2 f_T \gamma \bar{w}^2}{g d_o}, \quad (36a)$$

где ΔP_T — падение напора газа, обусловленное трением потока о поверхность насадки на 1 м высоты слоя (Градиент давления) в мм водяного столба или в кг/м^2 ;

f_T — безразмерный коэффициент трения;

$\bar{w}$ — средняя скорость в м/сек ;

γ — удельный вес газа в кг/м^3 ;

g — ускорение силы тяжести в м/сек^2 ;

$m = \frac{V_{св}}{S} = \frac{\bar{F}_a}{S}$ — гидравлический радиус, равный отношению свободного объема насадки к поверхности в единице объема (в 1 м^3);

$d_o = 4 m$ — эквивалентный диаметр.

В наших опытах скорость выражалась в м/сек , считая на полное сечение пустого скруббера $\bar{w}_0$. Таким образом

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_0}{F_a},$$

где $\bar{F}_a$ — среднее живое сечение насадки — величина численно равная свободному объему.

Определение действительной средней скорости газа в скруббере затруднительно, так как вследствие извилистости каналов неизвест-

на их длина. Однако, величина $\bar{w}$ более приближается к действительной средней скорости, чем $\bar{w}_0$.

Тогда

$$\Delta P_T = \frac{f_T \gamma \bar{w}_0^3}{2 g m \bar{F}_a^2} = \frac{2 f_T \gamma \bar{w}_0^3}{g d_0 \bar{F}_a^2}. \quad (36b)$$

Откуда

$$f_T = \frac{\Delta P_T g d_0 \bar{F}_a^2}{2 \gamma \bar{w}_0^3}. \quad (37)$$

Местные сопротивления при движении газа через насадку в основном обуславливаются повышенной турбулизацией потока вследствие сжатия и расширения газовой струи при движении по каналам переменного сечения.

Таким образом, потеря напора за счет местных сопротивлений

$$\Delta P_M = \Delta P_c + \Delta P_p,$$

где ΔP_c — потеря напора, обусловленная сжатием газовой струи;
 ΔP_p — потеря напора, обусловленная расширением газовой струи.

Движение газового потока по каналу переменного сечения можно условно представить как движение через серию последовательно включенных диафрагм.

Тогда

$$\Delta P_c = \frac{a w_2^3 \gamma}{2 g}, \quad (38)$$

где w_2 — скорость в м/сек в суженном сечении канала;
 a — коэффициент, зависящий от степени сжатия, т. е. от отношения площадей живого сечения до и после сжатия.

По уравнению неразрывности струи или непрерывности расхода имеем:

$$F_1 w_1 = F_2 w_2.$$

Тогда

$$w_2 = \frac{w_1 F_1}{F_2}$$

и

$$\Delta P_c = \frac{a \gamma w_1^3}{2 g} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^3. \quad (38a)$$

Потери, обусловленные расширением газовой струи:

$$\Delta P_p = \frac{\gamma (w_2 - w_1)^2}{2g} = \frac{\gamma w_1^2 \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2}{2g} \quad (39)$$

Если обозначить количество расширений и сжатий газовой струи при движении в каналах насадки на 1 м высоты слоя через $\frac{1}{n}$, то ΔP_m на 1 м высоты насадки будет равно:

$$\Delta P_m = \Delta P_0 + \Delta P_p = \frac{1}{n} \frac{\gamma w_1^2}{2g} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \\ + \frac{1}{n} \frac{\gamma w_1^2}{2g} \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 = \frac{1}{n} \frac{\gamma w_1^2}{2g} \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right], \quad (40)$$

но

$$w_1^2 = \frac{\bar{w}_0^2}{F_1^2}$$

и

$$\Delta P_m = \frac{1}{n} \frac{\gamma \bar{w}_0^2}{2g F_1^2} \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right]. \quad (40a)$$

Отсюда

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_m = \frac{2 f_T \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s \bar{F}_a^2} + \frac{1}{n} \frac{\gamma \bar{w}_0^2}{2g F_1^2} \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right] = \\ = \frac{\gamma \bar{w}_0^2}{g} \left\{ \frac{2 f_T}{d_s \bar{F}_a^2} + \frac{1}{2n F_1^2} \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right] \right\} \quad (41)$$

или

$$\frac{\Delta P g}{\gamma \bar{w}_0^2} = \frac{2 f_T}{d_s \bar{F}_a^2} + \frac{1}{2n F_1^2} \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right]. \quad (41a)$$

Умножив все члены уравнения (41a) на d_s и $\bar{F}_a^2$ и разделив на 2, получим:

$$\frac{\Delta P g d_s \bar{F}_a^2}{2 \gamma \bar{w}_0^2} = f_T + \frac{d_s}{4n} \left(\frac{\bar{F}_a}{F_1} \right)^2 \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right], \quad (41b)$$

но

$$\bar{F}_a = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

и

$$a = \psi \left(\frac{F_1}{F_2} \right);$$

поэтому

$$\left(\frac{\bar{F}_a}{F_1} \right)^2 \left[a \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right] = \psi'(\bar{F}_a).$$

Второй член правой части уравнения (41б) представляет собой коэффициент местных сопротивлений, обусловленных сжатием и расширением газового потока при движении в насадке

$$f_m = \frac{d_a}{4n} \psi'(\bar{F}_a).$$

Тогда

$$\frac{\Delta P g d_a \bar{F}_a^3}{2 \gamma \bar{w}_0^3} = f_T + f_m = f', \quad (42)$$

где f' — общий коэффициент сопротивления насадки.

Отсюда общая потеря напора газа при движении через насадку в скруббере на 1 м высоты слоя:

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^3}{g d_a \bar{F}_a^3} (f_T + f_m) = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^3 f'}{g d_a \bar{F}_a^3}. \quad (43)$$

При этом

$$\begin{aligned} f_T &= \varphi(Re), \\ f_m &= \psi(\bar{F}_a). \end{aligned}$$

Непосредственное определение F_1 и F_2 для беспорядочно загруженной насадки затруднительно, поэтому пока не приходится включать эти переменные в количественные выражения при обработке экспериментальных данных. Однако, ввиду того, что влияние скорости газа, плотности и диаметра фактически одно и то же в уравнениях, выражающих сопротивление трения и потери вследствие сжатия и расширения, а коэффициент местных сопротивлений не является функцией скорости, можно принять, что общий коэффициент сопротивления является также функцией числа Рейнольдса, т. е.

$$f' = \varphi'(Re).$$

Поэтому построение графика f' , вычисленного по уравнению (42), как функции Re , в логарифмических координатах является наиболее простым методом обработки и обобщения экспериментальных данных. Это и было впервые сделано Блейком и затем Чильтоном и Кольборном. Однако, вследствие того, что указанные авторы принимали при расчетах в качестве линейного размера потока не эквивалентный диаметр, а линейный размер элемента насадки, скорость же потока считали на общее сечение пустого скруббера, полученная ими закономерность для мелкой кусковой насадки имеет ограниченный характер. Она действительна лишь для размеров кусков, близких к тем, с которыми работали вышеупомянутые авторы, и совершенно не соответствовала экспериментальным данным по полым кольцевым насадкам. Примененный нами метод позволил установить закономерность, достаточно удовлетворитель-

но охватывающую экспериментальные данные как по кусковой, так и кольцевой насадке, т. е. являющейся общей для любой насадки из беспорядочно загруженных элементов правильной и неправильной геометрической формы.

Вывод уравнения для решетчатой насадки и колец Рашига, уложенных правильными рядами

В нашей работе с каждым типом решетчатой насадки проводились две серии опытов: при загрузке параллельно и при загрузке накрест. В первом случае движение газового потока в насадке по всей высоте слоя осуществлялось по параллельным каналам, образованным рейками решеток, и потеря напора газа обуславливалась лишь сопротивлением трения о боковую поверхность реек и внутреннюю поверхность стенок скруббера.

Во втором случае в местах пересечения двух соседних решеток происходило сжатие и расширение газовой струи, т. е. наряду с потерей напора за счет трения имели место потери напора за счет местных сопротивлений. Сравнивая результаты опытов при загрузке решеток параллельно и накрест, можно количественно определить долю потери напора за счет сопротивления трения и за счет местных сопротивлений.

Если n высота решетки в метрах, то количество плоскостей контакта в каждой загружаемой насадке, т. е. количество расширений и сжатий газовой струи на 1 м высоты насадки будет равно $\frac{1}{n}$.

Примем для выражения потери напора газа в решетчатой насадке то же уравнение (41). Но для решетчатой насадки максимальное живое сечение равно суммарной площади сечения каналов решеток, т. е. $F_1 = F_a$ и минимальное живое сечение равно доле свободной площади в плоскости пересечения (плоскости контакта) решеток, т. е.

$$F_2 = F_b,$$

Тогда

$$\Delta P = \frac{2 f_T \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s F_a^2} + \frac{1}{n} \frac{\gamma \bar{w}_0^2}{2 g F_a^2} \left[a \left(\frac{F_a}{F_b} \right)^2 + \left(\frac{F_a}{F_b} - 1 \right)^2 \right], \quad (44)$$

где

$$a = \varphi \left(\frac{F_a}{F_b} \right)$$

и

$$\left[a \left(\frac{F_a}{F_b} \right)^2 + \left(\frac{F_a}{F_b} - 1 \right)^2 \right] = \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right).$$

Тогда

$$\Delta P = \frac{2 f_T \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s F_a^2} + \frac{1}{n} \frac{\gamma \bar{w}_0^2}{2 g F_a^2} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right), \quad (44a)$$

или

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \tilde{w}_0^2}{g F_a^2 d_s} \left[f_T + \frac{d_s}{4n} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) \right]. \quad (446)$$

Отсюда общий коэффициент сопротивления

$$f' = f_T + \frac{d_s}{4n} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \frac{\Delta P g F_a^2 d_s}{2 \gamma \tilde{w}_0^2} \quad (45)$$

и коэффициент местных сопротивлений

$$f_m = f' - f_T = \frac{d_s}{4n} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \frac{m}{n} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right), \quad (46)$$

где m — гидравлический радиус.

Величина функции $\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right)$ может быть определена по экспериментальным данным путем построения

$$\frac{n}{m} (f' - f_T) \text{ против } \left(\frac{F_a}{F_b} \right).$$

Величина $\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right)$ может быть выражена как функция толщины отдельных досок (реек), из которых собрана решетка, и расстояния между досками (шага).

Обозначим толщину доски через d_t , расстояние между досками (шаг) через d_s и длину доски (канала) через d_w .

Тогда

$$F_a = \frac{d_s \cdot d_t}{(d_s + d_t) d_w} = \frac{d_s}{d_s + d_t}$$

и

$$F_b = \frac{d_s \cdot d_w - (d_s \cdot d_t) \frac{d_w}{d_s + d_t}}{(d_s + d_t) d_w} = \frac{d_s^2}{(d_s + d_t)^2}.$$

Откуда

$$\frac{F_a}{F_b} = \frac{d_s (d_s + d_t)^2}{(d_s + d_t) d_s^2} = \frac{d_s + d_t}{d_s}.$$

Таким образом

$$\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \psi \left(\frac{d_s + d_t}{d_s} \right).$$

Аналогичным образом находим, что для колец, загруженных в скруббер путем укладки правильными рядами в шахматном порядке

$$\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \psi \left(\frac{d_u}{d_s} \right),$$

где d_n — наружный диаметр колец и
 d_o — внутренний диаметр колец.

Окончательная формула для коэффициента сопротивления решетчатой насадки и колец, уложенных правильными рядами в шахматном порядке, будет иметь вид:

$$f' = f_T + f_m = \frac{\Delta P g F_a^2 d_o}{2 \gamma \bar{w}_0^2}, \quad (47)$$

где

$$f_m = \frac{m}{n} \psi \left(\frac{d_s + d_t}{d_s} \right) \text{ для решеток}$$

и

$$f_m = \frac{m}{n} \psi \left(\frac{d_n}{d_o} \right) \text{ для колец.}$$

Для случая, когда решетки уложены параллельными рядами и кольца трубчаткой, $f_m = 0$ и $f' = f_T$.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ СКРУББЕРНЫХ НАСАДОК И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гидравлическое сопротивление сухих насадок

а) Беспорядочно загруженная насадка. В опытах по определению сопротивления насадок из колец Рашига и кусковых материалов, загруженных в беспорядке, были замерены потери напора при различных скоростях воздуха.

В каждом опыте фиксировалась средняя скорость воздуха в м/сек, считая на полное сечение пустого (не заполненного насадкой) скруббера.

Значение падения напора, соответствующее данной скорости воздуха, выражалось в кг/м² (мм водяного столба) на 1 м высоты слоя насадки.

Исходя из экспериментальных данных, вычислялись коэффициент сопротивления f' и значения Eu (критерий Эйлера) и Re (критерий Рейнольдса) по формулам:

$$f' = \frac{\Delta P g d_s \bar{F}_a^2}{2 \gamma \bar{w}_0^2};$$

$$Eu = \frac{\Delta P \bar{F}_a^2}{\rho \bar{w}_0^2};$$

$$Re = \frac{4 m \bar{w}_0 \rho}{\bar{F}_a \mu} = \frac{d_s \bar{w}_0}{\bar{F}_a \nu},$$

де ΔP — потеря напора в кг/м²;

$\bar{F}_a$ — среднее живое сечение, численно равно среднему свободному объему насадки V_{ca} ;

$\bar{w}_0$ — средняя скорость воздуха в м/сек, считая на сечение пустого скруббера;

ρ — плотность воздуха в кг/сек²/м³;

ν — кинематическая вязкость в м²/сек;

m — гидравлический радиус насадки.

Поскольку наши опыты проводились в изотермических условиях при комнатной температуре, равной в среднем 20°C, при вычислении принимались постоянными значения для воздуха:

$$\gamma = 1,205 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_0^2 = 0,123 \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4};$$

$$\nu \cdot 10^5 = 14,5 \text{ м}^2/\text{сек}.$$

При вычислении гидравлического радиуса $m = \frac{\bar{F}_a}{S} = \frac{V_{ca}}{S}$ поверхность насадки S бралась с учетом поверхности стенок скруббера

$$S = S_1 + S_2,$$

где S_1 — поверхность насадки в м² на 1 м³ объема насаженной части скруббера;

S_2 — поверхность стенок скруббера в м² на 1 м³ объема насаженной части скруббера.

Для скруббера с $D = 305$ мм площадь поперечного сечения $A = 0,073$ м². Объему скруббера в 1 м³ соответствует длина трубы (высота скруббера)

$$l = \frac{1}{0,073} = 13,7 \text{ м}.$$

Поверхность стенок скруббера на 1 м³ объема насаженной част

$$S_2 = \pi D l = 3,14 \cdot 0,305 \cdot 13,7 = 13,1 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Соответственно для скруббера с $D = 103$ мм будет:

$$A = \frac{3,14 \cdot 0,103^2}{4} = 0,00835 \text{ м}^2;$$

$$l = \frac{1}{0,00835} = 120 \text{ м};$$

$$S_2 = 3,14 \cdot 0,103 \cdot 120 = 38,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

и для скруббера с $D = 65$ мм:

$$A = 0,00332;$$

$$l = 301 \text{ м};$$

$$S_2 = 61,5 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

При вычислении гидравлического радиуса наряду с учетом поверхности стенок скруббера, учитывалось также изменение свободного объема насадки в зависимости от изменения диаметра скруббера, обусловленного влиянием стенок скруббера на распределение насадки. Для этого находилось отношение среднего диаметра насадки к диаметру скруббера и по найденному значению определялся поправочный коэффициент по диаграмме 2. Умножением количества элементов насадки в м^3 при бесконечно большом диаметре скруббера на поправочный коэффициент получаем действительное количество элементов насадки в 1 м^3 насаженного объема для данного диаметра скруббера, а отсюда — действительную поверхность насадки и суммарный объем, занимаемый элементами насадки.

Вычитая из единицы суммарный объем, занимаемый элементами насадки, находим действительный свободный объем насадки для данного диаметра скруббера.

Поверхность насадки в единице объема также вычислялась для действительного количества загружаемых в скруббер элементов насадки. Так, например, для насадки из колец Рашига размером $14,5$ мм, загруженной в скруббер с $D = 103$ мм:

$$\frac{d}{D} = \frac{14,5}{103} = 0,141.$$

Поправка по диаграмме 2-й равна $0,95$. Действительное количество колец в 1 м^3 насадки $= 250\,000 \cdot 0,95 = 237\,000$, где $250\,000$ — количество колец в единице объема при бесконечно большом диаметре скруббера (см. табл. 3).

Свободный объем $V_{\text{св}} = 1 - 237\,000 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 0,715$.

Действительная поверхность насадки в единице объема $S_1 = 237\,000 \cdot 13,2 \cdot 10^{-4} = 311 \text{ м}^2/\text{м}^3$, где $1,2 \cdot 10^{-6}$ — объем в м^3 и $13,2 \cdot 10^{-4}$ — поверхность в м^2 одного кольца.

Таким образом, для колец Рашига размером $14,5$ мм, загруженных в скруббер с $D = 103$ мм, гидравлический радиус

$$m = \frac{V_{\text{св}}}{S_1 + S_2} = \frac{0,715}{311 + 38,8} = 0,00204.$$

Числовые значения гидравлического радиуса m — для различных насадок с учетом поверхности стенок скруббера при диаметре последнего в 305 мм приведены в графе 9-й табл. 3.

В графе 8-й той же таблицы даны числовые значения гидравлического радиуса насадок при загрузке в скруббер бесконечно большого диаметра, которые действительны для скруббера любого диаметра при условии $\frac{d}{D} < 0,09$.

В табл. 3 указан гидравлический радиус для круглого гравия среднего размера 42 мм при загрузке в скруббер с $D = 750$ мм (опыты Пайрета и др.).

Поверхность стенок скруббера при диаметре последнего—750 мм составляет всего лишь $5,25 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Чем больше диаметр скруббера, тем меньше влияние стенок скруббера на распределение насадки, а стало быть, тем меньшее влияние оказывают вводимые поправки на величину гидравлического радиуса. При отношении $\frac{d}{D} \leq 0,09$, что всегда имеет место в промышленных скрубберах, можно принимать числовое значение гидравлического радиуса насадки, соответствующее скрубберу с бесконечно большим диаметром, т. е. не вводить никаких поправок. Так, например, для скруббера с $D = 2\,000$ мм поверхность стенок самого скруббера составляет всего лишь $2 \text{ м}^2/\text{м}^3$. При загрузке скруббера кольцами Рашига размером $35 \times 35 \times 0,5$ мм, имеющими поверхность $147 \text{ м}^2/\text{м}^3$, доля поверхности стенок скруббера к общей поверхности контакта составляет всего

$$\frac{2 \cdot 100}{147 + 2} = 1,3\%.$$

При обработке экспериментальных результатов наших опытов были использованы некоторые данные других авторов (Маха, Пайрета и др.). К сожалению, фактический материал по сопротивлению беспорядочно загруженных скрубберных насадок, полученный рядом исследователей, упоминавшихся выше, не мог быть обработан из-за отсутствия необходимых для вычислений данных по характеристике насадок.

Результаты наших опытов в графической форме в логарифмических координатах представлены на рис. 28 и 29.

На графиках по оси ординат отложена величина потери напора в мм водяного столба ($\text{кг}/\text{м}^2$) на 1 м высоты слоя насадки, а по оси абсцисс — линейная скорость воздуха в $\text{м}/\text{сек}$, считая на общее поперечное сечение скруббера.

Как это видно из графиков, зависимость потери напора от скорости воздуха для каждого типа и размера насадки характеризуется прямой линией, удовлетворяющей уравнению:

$$\Delta P = A w^n.$$

Угол наклона прямых к оси абсцисс зависит от типа насадки и характера укладки.

На рис. 28 представлено сопротивление сухих (неорошаемых) насадок из колец Рашига. На графике кружками обозначены наши

экспериментальные данные и перечеркнутыми кружками — экспериментальные данные Маха. Прямая 1 характеризует собой сопротивление 50-мм керамических колец Рашига, уложенных в скруб-

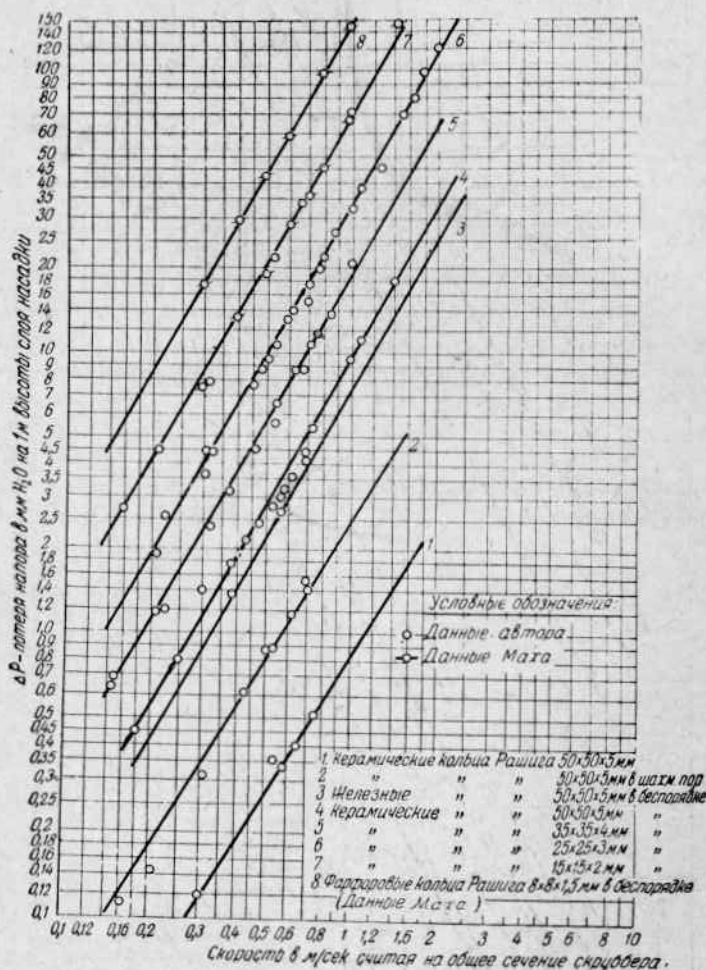


Рис. 28. Сопротивление сухих (неорошаемых) насадок из колец Рашига, как функция скорости воздуха.

бер правильными рядами — торец с торцом — и образующих собой рубчатку со сплошными каналами вдоль скруббера.

Прямая 2 — то же для тех же колец, но уложенных в шахматном порядке, так что в местах контакта выше и ниже лежащих рядов колец имеет место сужение живого сечения скруббера.

Остальные прямые характеризуют собой сопротивление колец Рашига различных размеров, загруженных в скруббер в беспоряд-

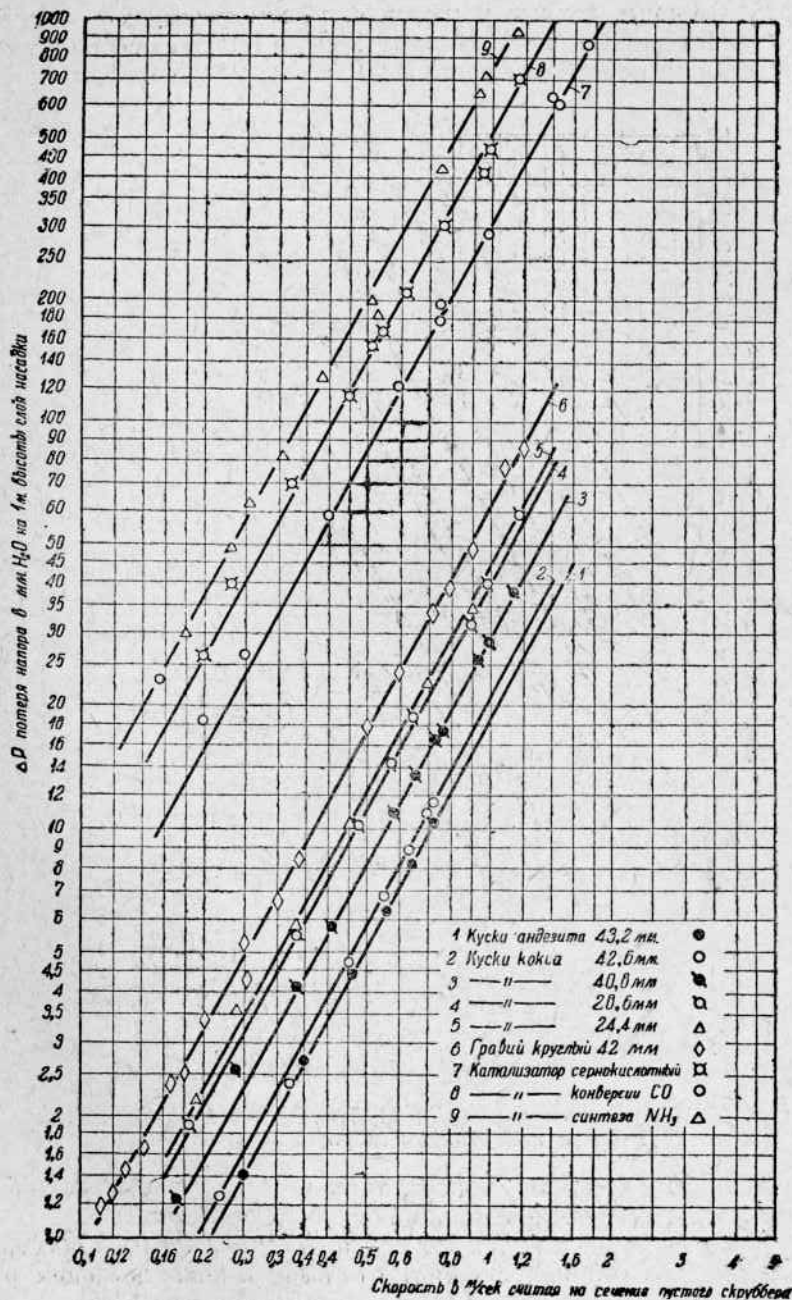


Рис. 29. Сопротивление сухих (неорошаемых) насадок из кускового материала, как функция скорости воздуха.

ке (засыпкой). Как это видно из сравнения прямых 3—8, для однотипной насадки при одинаковом характере загрузки (засыпка) числовое значение n (угол наклона прямых к оси абсцисс) остается

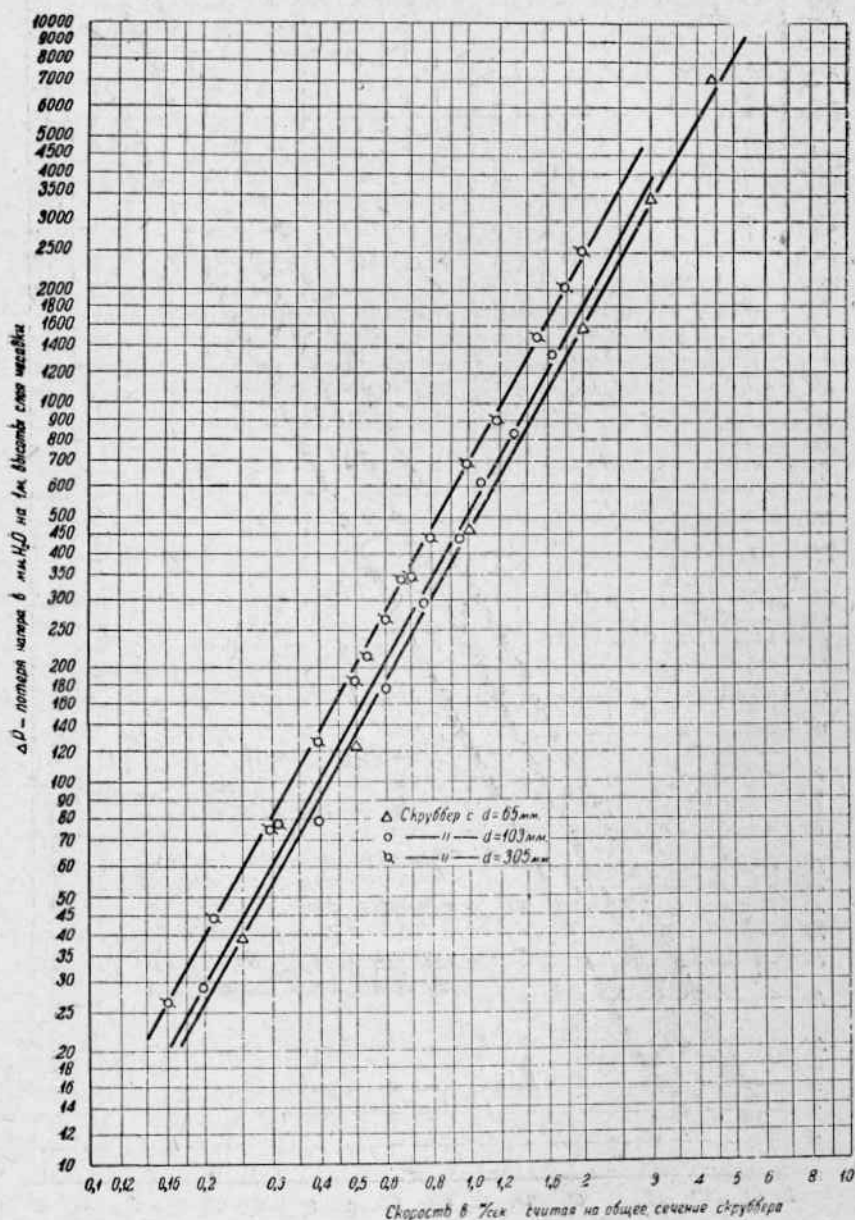


Рис. 30. Сопротивление сухих колец Рашига $15 \times 15 \times 2$ мм, загруженных в скрубберы с $d=65$; 103; 205 мм, как функция скорости воздуха.

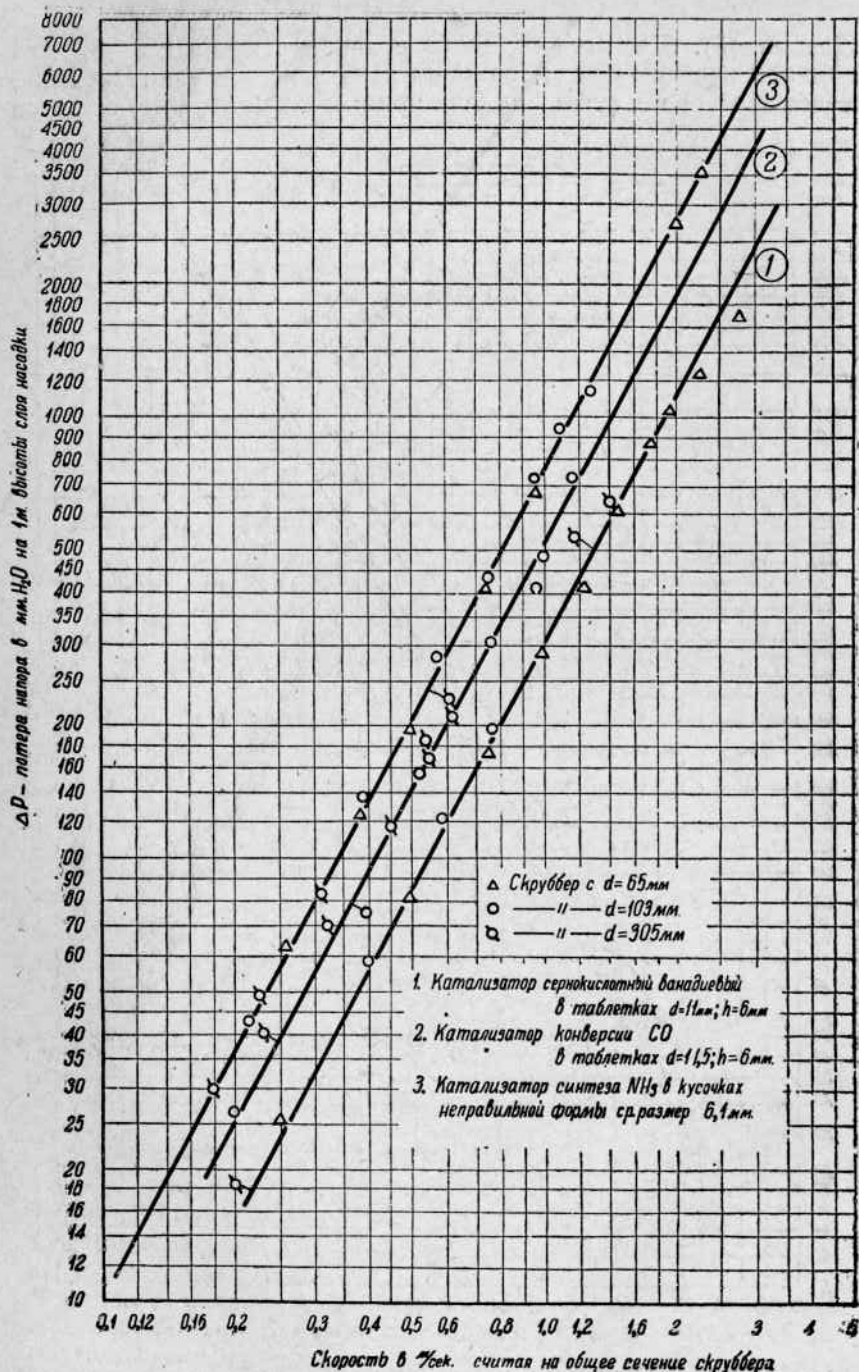


Рис. 31. Сопротивление катализаторов, загруженных в скрубберы с $d=65; 103; 305$ мм, как функция скорости воздуха.

постоянным для всех размеров насадки — прямые параллельные. Для колец, уложенных правильными рядами, угол наклона несколько меньше (прямые 1—2).

Числовое значение коэффициента A , представляющее собой сопротивление слоя насадки высотой в 1 м при скорости воздуха, равной 1 м/сек, зависит от размера элементов насадки и возрастает с уменьшением размера колец.

На рис. 29 представлено сопротивление сухих насадок из кускового материала, загруженных в беспорядке. Прямая 6 для круглого гравия построена по экспериментальным данным Пайрета с сотрудниками. Для сопротивления кусковой насадки мы имеем закономерность, аналогичную установленной для колец Рашига, загруженных в беспорядке.

Влияние диаметра скруббера на сопротивление насадок одного и того же размера наглядно иллюстрируется рис. 30 и 31.

Прямые рис. 30 характеризуют собой сопротивление керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ в скрубберах с диаметром 65, 103 и 305 мм. Как это видно из графика, сопротивление колец при прочих равных условиях возрастает с увеличением диаметра скруббера. В скрубберах с малым диаметром (65—103 мм) при значении $\frac{d}{D} > 0,09$, стенки скруббера оказывают большое влияние на распределение насадки. Вследствие наличия большого количества пустот у стенок скруббера при малом диаметре последнего свободный объем насадки больше, а поверхность насадки в единице объема меньше, чем для насадки того же размера, загруженной в скруббер с большим диаметром, когда $\frac{d}{D} < 0,09$. Поэтому вполне естественно, что сопротивление одной и той же насадки в скрубберах с небольшим диаметром при $\frac{d}{D} > 0,09$ различно. Следовательно, при вычислении коэффициента сопротивления f' необходимо принимать во внимание свободный объем и поверхность насадки в данных конкретных условиях. При этом оказывается, что коэффициент сопротивления во всех случаях оказывается одинаковым при различном значении потери напора.

Опыты в тех же самых скрубберах, проведенные с более мелкой насадкой (аммиачный катализатор в кусочках, катализаторы конверсии окиси углерода и сернокислотный в таблетках), когда во всех случаях $\frac{d}{D} < 0,09$, показали, что сопротивление не зависит от диаметра скруббера. Это наглядно иллюстрируется рис. 31. Для каждого типа насадки все данные, полученные в опытах в скрубберах с различным диаметром, укладываются на одну прямую.

На рис. 32 представлен в логарифмических координатах график $E_{\text{и}} = \varphi(Re)$ для насадки из колец Рашига и кускового материала.

При нанесении экспериментальных данных на график $f' = \varphi(Re)$ в логарифмических координатах получается ломаная линия (рис. 33), характеризующая собой закон сопротивления сухих скрубберных

насадок аналогично тому, как это имеет место при движении жидкости в трубах.

Как уже указывалось, аналогичная закономерность была установлена Чильтоном и Кольборном для кусковых насадок небольших и близких между собой размеров. Однако, указанным авторам не удалось установить аналогичной закономерности для кольцевых насадок, вследствие того, что принятый ими в качестве эквивалентного диаметра — средний диаметр частицы насадки не отражает собой гидравлических свойств насадки. Наш метод обработки приводит к общему закону сопротивления беспорядочно загруженных скрубберных насадок.

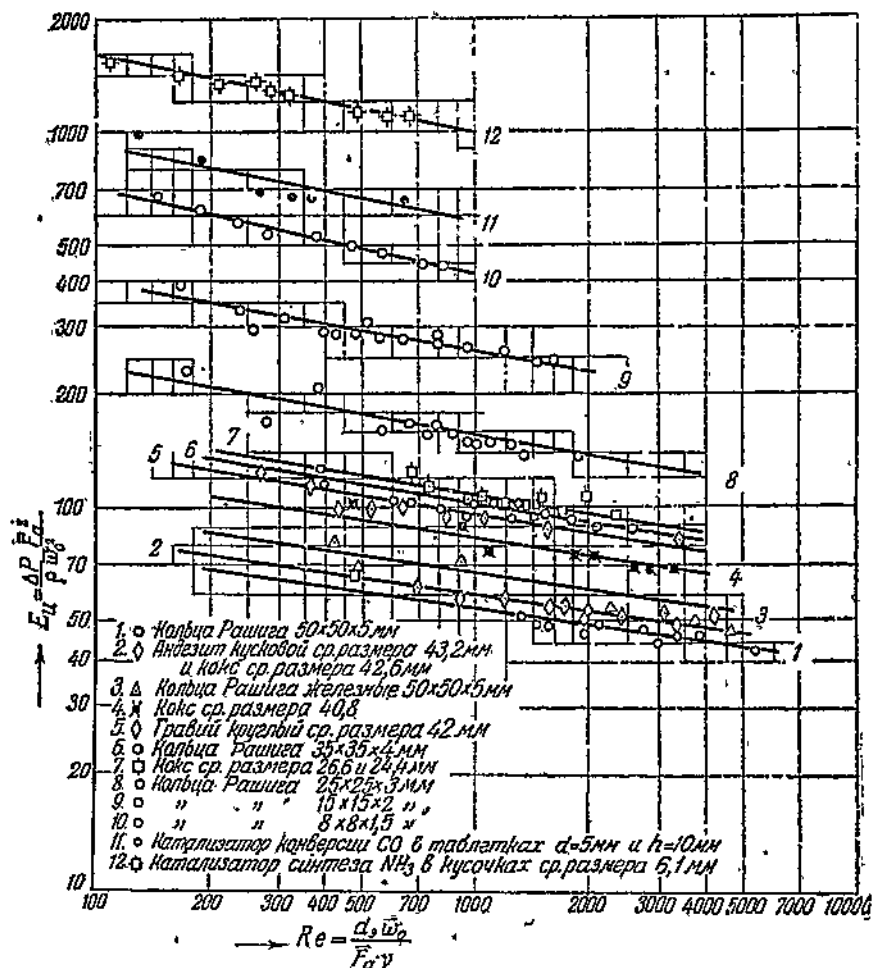


Рис. 32. График $E_u = f(Re)$ для насадок из колец Рашига и из кускового материала.

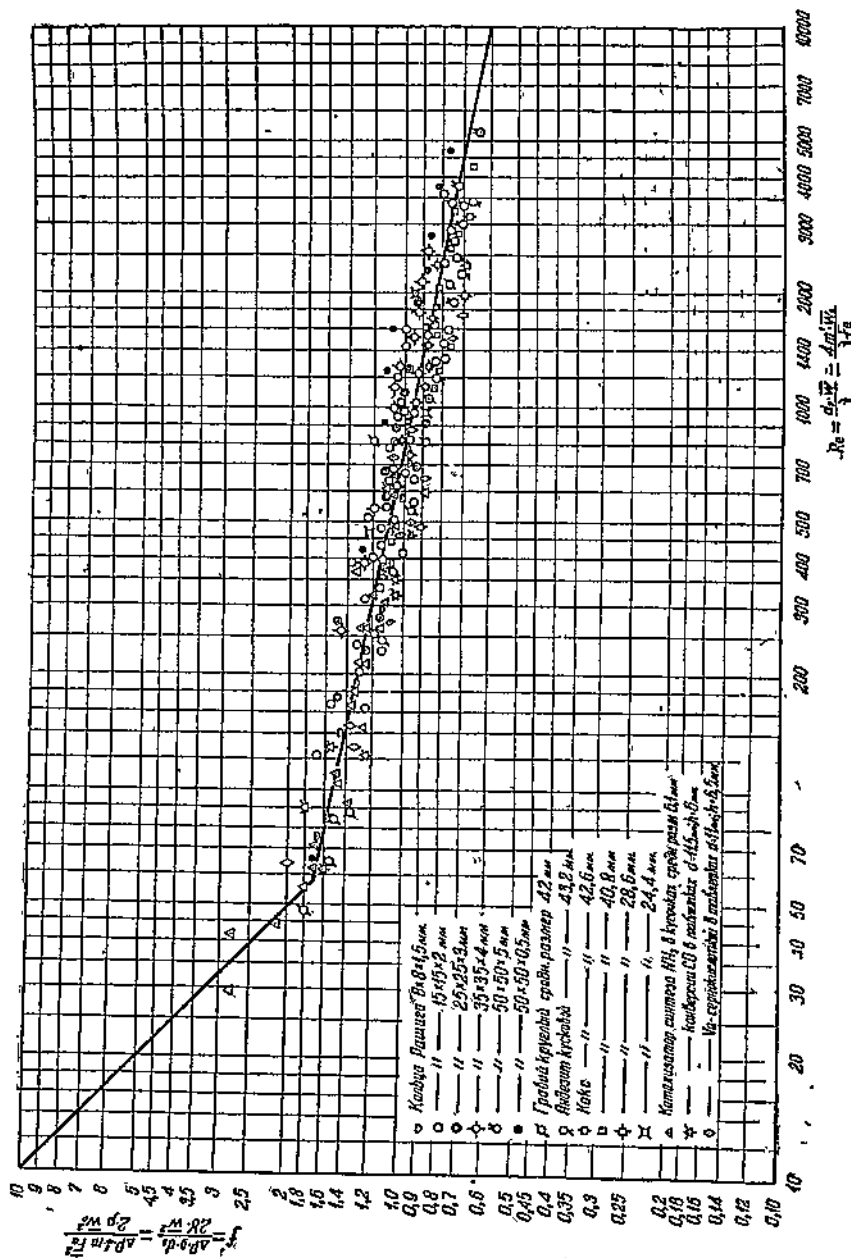


Рис. 33. Коэффициент сопротивления кусковых и кольцевых скрубберных насадок, как функция числа Рейнольдса.

Из рис. 33 видно, что точки, характеризующие собой коэффициент сопротивления кусковых и кольцевых насадок различного размера достаточно удовлетворительно располагаются на графике.

Точки для коэффициента сопротивления насадки из седлообразных элементов Берля, вычисленные по экспериментальным данным Маха, также вполне удовлетворительно укладываются на графике.

Левая ветвь прямой, направленная к оси абсцисс под углом 45° , характеризует собой ламинарный режим движения и удовлетворяет уравнению:

$$f' = \frac{100}{Re}. \quad (48)$$

В нашей работе было проведено ограниченное количество опытов в области ламинарного режима. Однако, характер установленной зависимости подтверждается сравнением большим количеством данных Блейка, использованных Чильтоном и Кольборном при построении своей диаграммы.

Правая ветвь соответствует турбулентному режиму движения и характеризуется уравнением:

$$f' = \frac{3,8}{Re^{0,2}} = 3,8 Re^{-0,2}. \quad (49)$$

Переход от ламинарного режима движения к турбулентному при движении жидкости (газа) в скрубберах (насаженных трубах) наступает значительно раньше, чем в пустых трубах и соответствует $Re=50-60$.

Наши экспериментальные данные в турбулентной области ограничиваются значениями чисел $Re=5\ 500-6000$. Принимая во внимание данные Вагнера, Гольшуга и Барта для сопротивления доменных шихт, можно сделать заключение, что при значениях числа $Re > 7\ 000$ коэффициент сопротивления становится постоянным.

Таким образом, можно считать установленным, что при движении жидкости (газа) через скрубберную насадку и измельченные твердые материалы существует три области движения: область ламинарного режима, когда преобладают силы внутреннего трения (при значениях Re ниже $50-60$); область неустойчивого турбулентного режима (в пределах значений Re от $50-60$ до $7\ 000$), и область турбулентного режима, в которой коэффициент трения становится постоянным независимым от Re (при значениях Re выше $7\ 000$).

Установленные закономерности сопротивления скрубберных насадок по форме аналогичны таковым при движении газового потока в шероховатых трубах с шероховатостью второго рода. При этом также следует иметь в виду, что материал стенки скруббера и насадки не оказывает влияния на величину сопротивления. Отсутствие влияния стенки скруббера на сопротивление насадки было установлено также опытами Фернеса. На величину потери напора на единицу высоты слоя не оказывает влияния и общая высота слоя.

Пользуясь графиком 33 и уравнением (49), можно вычислить коэффициент сопротивления любой беспорядочно загруженной скрубберной насадки, состоящей из кусков неправильной формы, любой величины и тел правильной геометрической формы как сплошных, так и полых.

Общее уравнение для потери напора газа на 1 м высоты слоя, при движении через насадку для случая неустойчивого турбулентного режима, преобладающего в промышленной практике, будет иметь вид:

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^2 f'}{g d_s \bar{F}_a^2} = \frac{7,6 \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s \bar{F}_a^2 Re^{0,2}} = \frac{7,6 \gamma \bar{w}_0^{1,8} v^{0,2}}{g d_s^{1,2} \bar{F}_a^{1,8}} \quad (50)$$

При значениях числа Рейнольдса выше 7000 наступает устойчивый турбулентный режим и коэффициент сопротивления f' становится постоянным, т. е. имеет место квадратичный закон сопротивления. Последний, как известно, является основным признаком автомодельности процесса.

Числовое значение f' при $Re = 7000$ равно 0,65 (см. рис. 33). Тогда, очевидно, при больших значениях Re для вычисления потери напора будем иметь следующее уравнение:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot 0,65 \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s \bar{F}_a^2} = \frac{1,3 \gamma \bar{w}_0^2}{g d_s \bar{F}_a^2} \quad (51)$$

И, наконец, в области ламинарного режима движения, т. е. при $Re < 60$ уравнение для вычисления потери напора приобретает вид

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^2 100}{g d_s \bar{F}_a^2 Re} = \frac{200 \gamma \bar{w}_0 v}{g d_s^2 \bar{F}_a} \quad (52)$$

При пользовании этими уравнениями во всех случаях вместо $\bar{F}_a$ можно подставлять значение V_{ca} для данного типа насадки.

Проведенные нами опыты по определению сопротивления насадок при работе под повышенным давлением (до 5 атм) показали, что при постоянной весовой скорости газа с повышением давления газа потеря напора уменьшается. Это находится в полном соответствии с установленными нами уравнениями для потери напора газа при движении его в скрубберной насадке.

При повышении давления удельный вес газа увеличивается, а линейная скорость уменьшается пропорционально давлению. Поскольку потеря напора является функцией удельного веса газа в первой степени и скорости газа в степени 1,8 (уравнение 50) и 2 (уравнение 51), повышение давления газа связано с уменьшением потери напора. При вычислении потери напора газа при повышенных давлениях необходимо в уравнения (50) и (51) подставлять значения w_0 и γ , соответствующие данному давлению.

б) Решетчатая насадка и кольца Рашига, уложенные правильными рядами. Результаты опытов по определению сопротивления сухих насадок из деревянных решеток в зависимости от скорости воздуха

представлены в графической форме на рис. 34. Как и в случае беспорядочно загруженных насадок, зависимость сопротивления

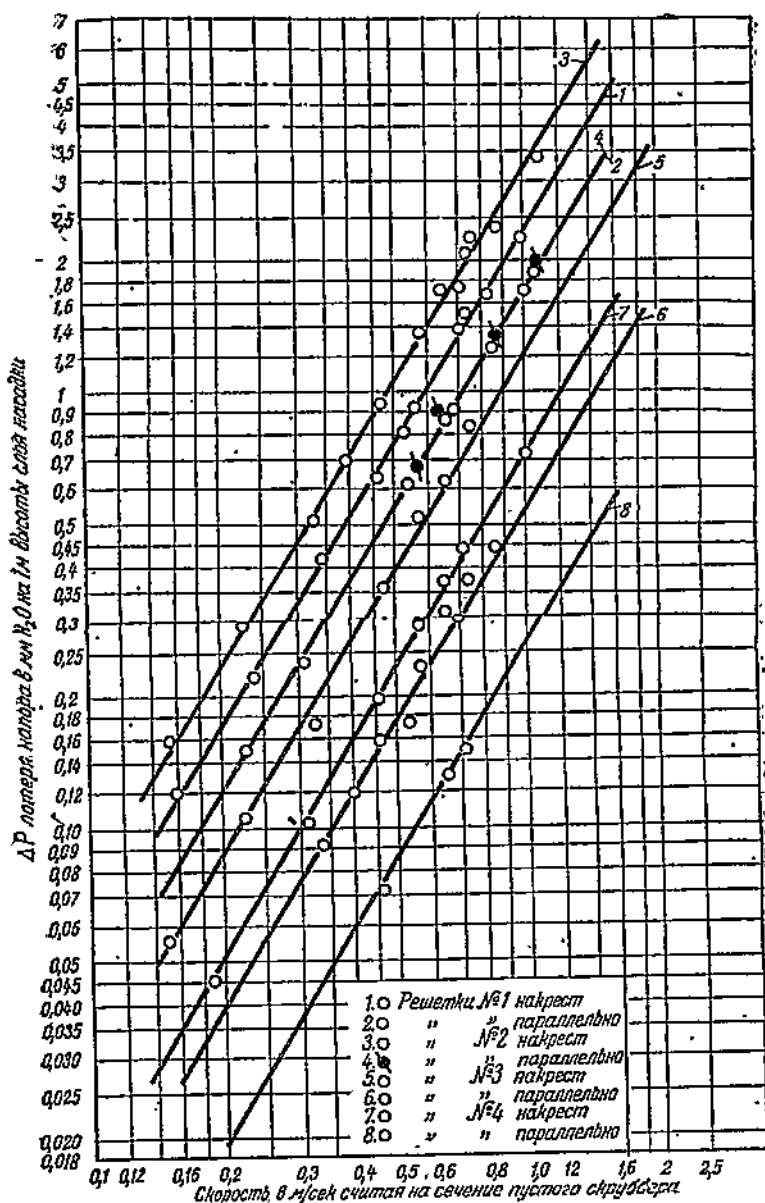


Рис. 34. Сопротивление сухих насадок из деревянных решеток (хордовая насадка), как функция скорости воздуха.

каждого типа решеток от скорости воздуха в логарифмических координатах выражается прямой линией. Угол наклона прямых к оси абсцисс несколько меньший, чем для беспорядочно загруженных колец Рашига и кусковых насадок, и одинаков с прямыми 1 и 2 рис. 28 для колец Рашига, уложенных правильными рядами.

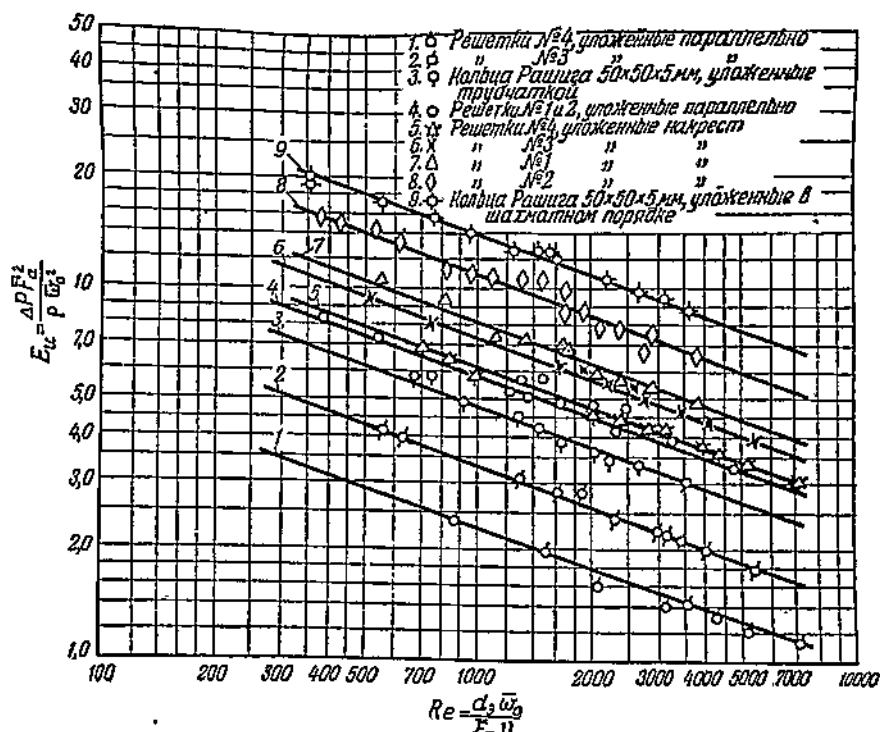


Рис. 35. График $Eu = f(Re)$ для насадок из деревянных решеток и колец Рашига, загруженных укладкой.

Таким образом, мы имеем одинаковую закономерность сопротивления насадок из решеток и уложенных правильными рядами колец, что свидетельствует о сходственности характера движения потока в этих случаях, когда сопротивление обусловлено главным образом трением потока о вертикальную поверхность насадки. Числовое значение угла наклона не зависит от расстояния между рейками решетки и высоты реек; график представляет собой серию параллельных прямых. При прочих равных условиях сопротивление решеток зависит от расстояния между рейками, увеличиваясь с уменьшением этого расстояния (шага). При загрузке решеток параллельными рядами сопротивление не зависит от высоты реек решеток. Это подтверждается опытами с решетками № 1 и № 2. При параллельной загрузке их в скруббер

сопротивление их оказалось одинаковым (прямая 2 рис. 34), хотя высота реек в первом случае равнялась 100 мм, а во втором—50 мм.

На рис. 35 представлен график $Ei = \varphi(Re)$ для насадки из деревянных решеток и колец Рашига, загруженных укладкой. Как и в случае аналогичного графика для беспорядочно загруженной насадки из колец Рашига и кускового материала в пределах исследованной нами области автомодельность не имеет места. Как известно, одним из признаков автомодельности является квадратичный закон сопротивления, являющийся следствием постоянства критерия Ei

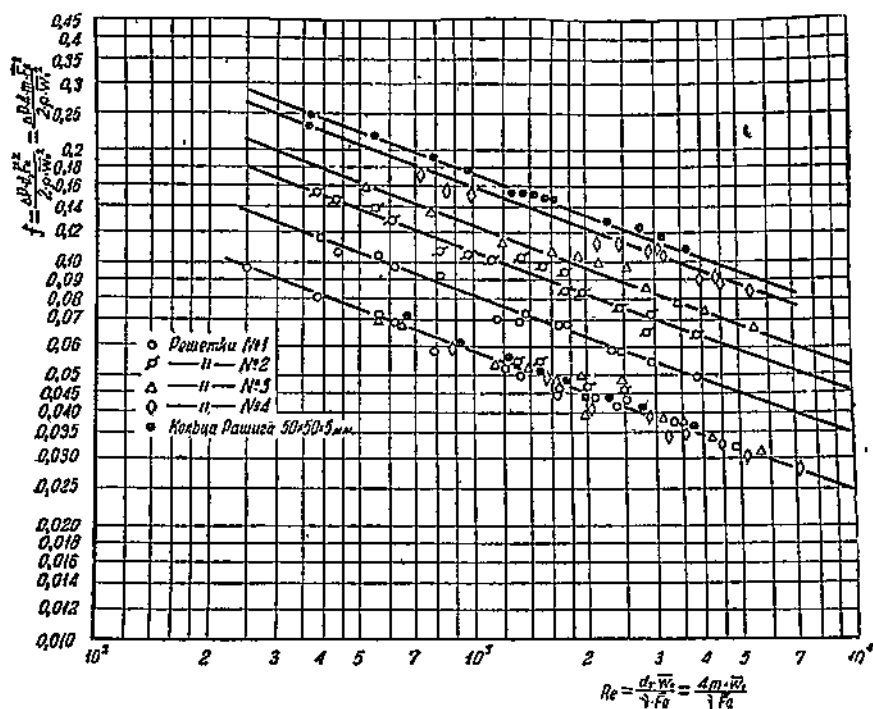


Рис. 36. Коэффициент сопротивления сухих насадок из деревянных решеток как функция числа Рейнольдса.

или коэффициента сопротивления. По характеру прямых рис. 35 можно заключить, что автомодельность в случае решетчатых насадок и правильно уложенных колец должна наступить при значениях Re значительно больших, чем для беспорядочно загруженной насадки.

При нанесении экспериментальных данных для решетчатых насадок и правильно уложенных колец Рашига на график $f = \varphi(Re)$ в логарифмических осях получается серия параллельных прямых линий, характеризующих собой закон сопротивления (рис. 36).

Ограниченность условий проведения опытов (недостаточный диапазон изменения скорости потока) не дала нам возможности уста-

новить нижний предел турбулентного режима, когда последний переходит в ламинарный, и верхний предел, когда коэффициент сопротивления становится постоянным и не зависит от числа Re .

Как видно из рис. 36, экспериментальный материал охватывает лишь область неустойчивого турбулентного режима; однако он полностью соответствует условиям работы промышленных скрубберов.

На нижней прямой (рис. 36) укладываются экспериментальные точки, соответствующие коэффициенту сопротивления параллельно загруженных решеток и колец Рашига, уложенных трубчаткой. Коэффициент сопротивления обусловлен в этом случае только трением газового потока о вертикальную поверхность насадки при движении в сплошных вертикальных каналах. Закон сопротивления в этом случае выражается уравнением:

$$f_T = \frac{0,78}{Re^{0,375}}. \quad (53)$$

С помощью этого уравнения может быть вычислен коэффициент сопротивления любой башенной насадки, образующей при загрузке сплошные вертикальные каналы.

При загрузке решеток накрест, а также колец Рашига укладкой в шахматном порядке для каждой насадки получается свой закон сопротивления, который выражается следующими уравнениями:

Для решеток № 1

$$f' = \frac{1,1}{Re^{0,375}}. \quad (54)$$

Для решеток № 2

$$f' = \frac{1,42}{Re^{0,375}}. \quad (55)$$

Для решеток № 3

$$f' = \frac{1,66}{Re^{0,375}}. \quad (56)$$

Для решеток № 4

$$f' = \frac{2,13}{Re^{0,375}}. \quad (57)$$

Для керамических колец Рашига размером $50 \times 50 \times 5$ мм

$$f' = \frac{2,3}{Re^{0,375}}. \quad (58)$$

В этих уравнениях коэффициент сопротивления f' является суммой коэффициента сопротивления трения f_T и коэффициента местных сопротивлений f_m , обусловленного сжатием и расширением потока в местах пересечения рядов насадки.

Как было показано выше:

$$f_{\text{м}} = f' - f_T = \frac{m}{n} \psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right),$$

где $\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \psi \left(\frac{d_s + d_t}{d_s} \right)$ для решеток и

$$\psi \left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \psi \left(\frac{d_n}{d_s} \right) \text{ для колец.}$$

Имея для каждого типа решеток числовые значения f' , полученные из опытов при загрузке накрест, и значения f_T из опытов при параллельной загрузке, легко вычислить числовое значение коэффициента местных сопротивлений $f_{\text{м}}$ и найти функциональную зависимость его от толщины реек и расстояния между ними для решет-

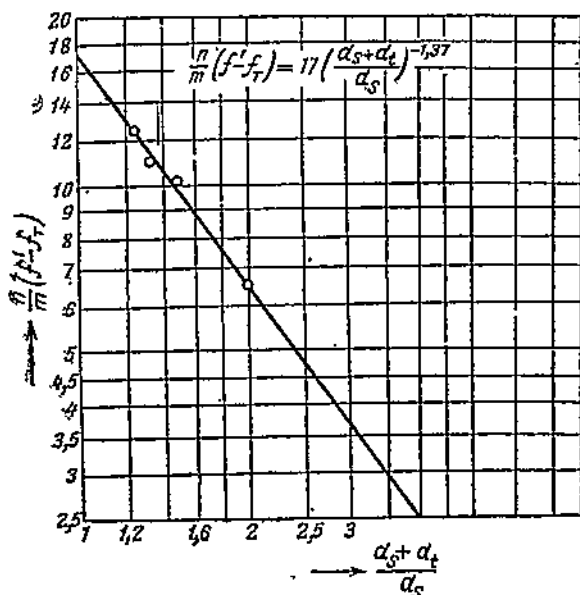


Рис. 37. График $\frac{n}{m} (f' - f_T)$, как функция $\frac{d_s + d_t}{d_s}$.

чатых насадок и отношения наружного и внутреннего диаметра для колец. Имеем

$$\frac{n}{m} f_{\text{м}} = \frac{n}{m} (f' - f_T) = \psi \left(\frac{d_s + d_t}{d_s} \right).$$

В случае насадки из колец Рашига значение $\frac{d_s + d_t}{d_s}$ соответствует: $\frac{d_n}{d_s}$.

Числовое значение $\frac{d_s + d_t}{d_s}$ в наших опытах при толщине реек — 10 мм и расстоянии между рейками для решеток № 1 и № 2 —

10 мм, № 3 — 20 мм и № 4 — 30 мм будет соответственно равно 2, 1,5; 1,33. Для колец Рашига при наружном диаметре 50 мм и внутреннем 40 мм значение $\frac{d_u}{d_s} = 1,25$. Откладывая эти значения по оси абсцисс на график (рис. 37) против значений $\frac{n}{m} (f' - f_T)$ для соответствующих насадок (при $Re = 1$) получаем прямую линию, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{n}{m} f_m = \frac{n}{m} (f' - f_T) = 17 \left(\frac{d_s + d_t}{d_s} \right)^{-1,37}.$$

Комбинируя это уравнение с уравнением (53), получаем общее выражение для коэффициента сопротивления решетчатых насадок и колец Рашига, загруженных укладкой в шахматном порядке:

$$f' = f_T + f_m = Re^{-0,375} \left[0,78 + 17 \frac{m}{n} \left(\frac{F_a}{F_b} \right)^{-1,37} \right], \quad (59)$$

где

$$\left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \frac{d_s + d_t}{d_s} \text{ для решеток и}$$

$$\left(\frac{F_a}{F_b} \right) = \frac{d_u}{d_s} \text{ для колец, уложенных в порядке.}$$

Общее уравнение для потери напора газа при движении через насадку из решеток и колец Рашига, загруженных укладкой в шахматном порядке на 1 м высоты слоя, будет иметь вид:

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^3}{g F_a^2 d_s} Re^{-0,375} \left[0,78 + \frac{m}{n} \frac{17}{\left(\frac{F_a}{F_b} \right)^{1,37}} \right] \quad (60)$$

или

$$\Delta P = \frac{2 \gamma \bar{w}_0^{1,625} \sqrt{0,375}}{g F_a^{1,625} d_s^{1,375}} \left[0,78 + 17 \frac{m}{n} \left(\frac{F_a}{F_b} \right)^{-1,37} \right]. \quad (60a)$$

Для случая параллельной укладки решеток и загрузки колец трубчаткой

$$\Delta P = \frac{2 \gamma w^2}{g F_a^2 d_s} \cdot \frac{0,78}{Re^{0,375}} = \frac{1,56 \gamma \bar{w}_0^{1,625} \sqrt{0,375}}{g F_a^{1,625} d_s^{1,375}}. \quad (61)$$

С помощью уравнений (60) и (61) можно вычислить потерю напора газа при движении через любую насадку, состоящую из регулярно загруженных колец, решеток и т. д. для неустойчивого турбулентного режима.

Сравнивая числовые значения общего коэффициента сопротивления для решеток № 1 и № 2, мы видим, что повышение коэффициента сопротивления решеток № 2 обусловлено возрастанием местных

сопротивлений. Из уравнений (53), (54) и (55) при значении $Re \geq 1$ для решеток № 1, имеем:

$$f_{\text{м}} = 1,1 - 0,78 = 0,32$$

и для решеток № 2

$$f_{\text{м}} = 1,42 - 0,78 = 0,64.$$

Таким образом во втором случае коэффициент местных сопротивлений в два раза больше, что и следовало ожидать, так как высота реек решеток № 2 в два раза меньше, чем решеток № 1 и, следовательно, при загрузке накрест количество плоскостей контакта будет в два раза большим.

При обработке экспериментальных данных по сопротивлению насадок из решеток и правильно уложенных колец Рашига поверхность насадки так же как и для беспорядочно загруженной, принималась с учетом поверхности стенок скруббера.

Значения гидравлического радиуса различных насадок, вычисленные с учетом поверхности стенок скруббера и использованные нами при обработке экспериментальных данных, приведены в табл. 3 и 4.

Установленные нами законы сопротивления газа при движении через насадки как при беспорядочной, так и при регулярной загрузке их, могут быть положены в основу проектирования скрубберов и башен, а также других промышленных аппаратов, в которых имеет место заполнение измельченными твердыми материалами или регулярно уложенными элементами правильной геометрической формы, например, контактных аппаратов, газосмесителей, регенераторов и т. п.

Математическая форма установленных закономерностей позволяет использовать их при расчете аппаратов, предназначенных для работы как при атмосферном, так и повышенных давлениях.

С известным приближением полученные нами уравнения могут быть использованы также для расчета сопротивления слоя топлива, в газогенераторах, шихты доменных печей, известково-обжигательных печей и других печей шахтного типа.

Следует при этом, однако, иметь в виду, что непостоянство гранулометрического состава материала и наличие мелочи и пыли в материале создает дополнительное сопротивление газовому потоку, которое не поддается расчету.

Гидравлическое сопротивление орошаемых насадок

Движение газового потока в орошаемой насадке значительно сложнее, чем в сухой. Орошающая насадку жидкость при своем движении сверху вниз не только сужает каналы, по которым проходит противотоком газ, но и значительно изменяет влияние всех до сих пор рассмотренных факторов на потери давления.

Сопротивление орошаемой насадки возрастает не только благо-

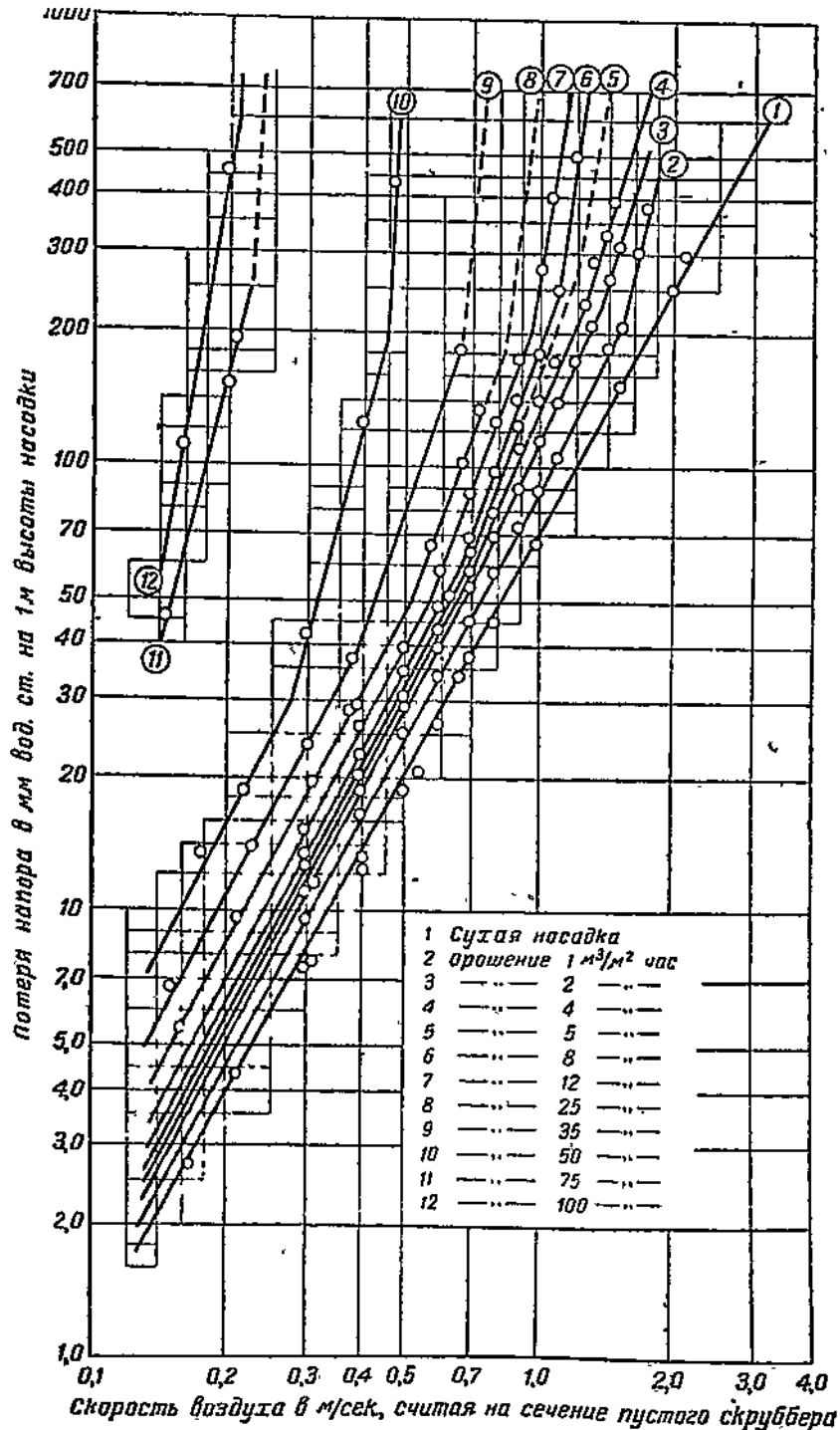


Рис. 38. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2 \text{ мм}$, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

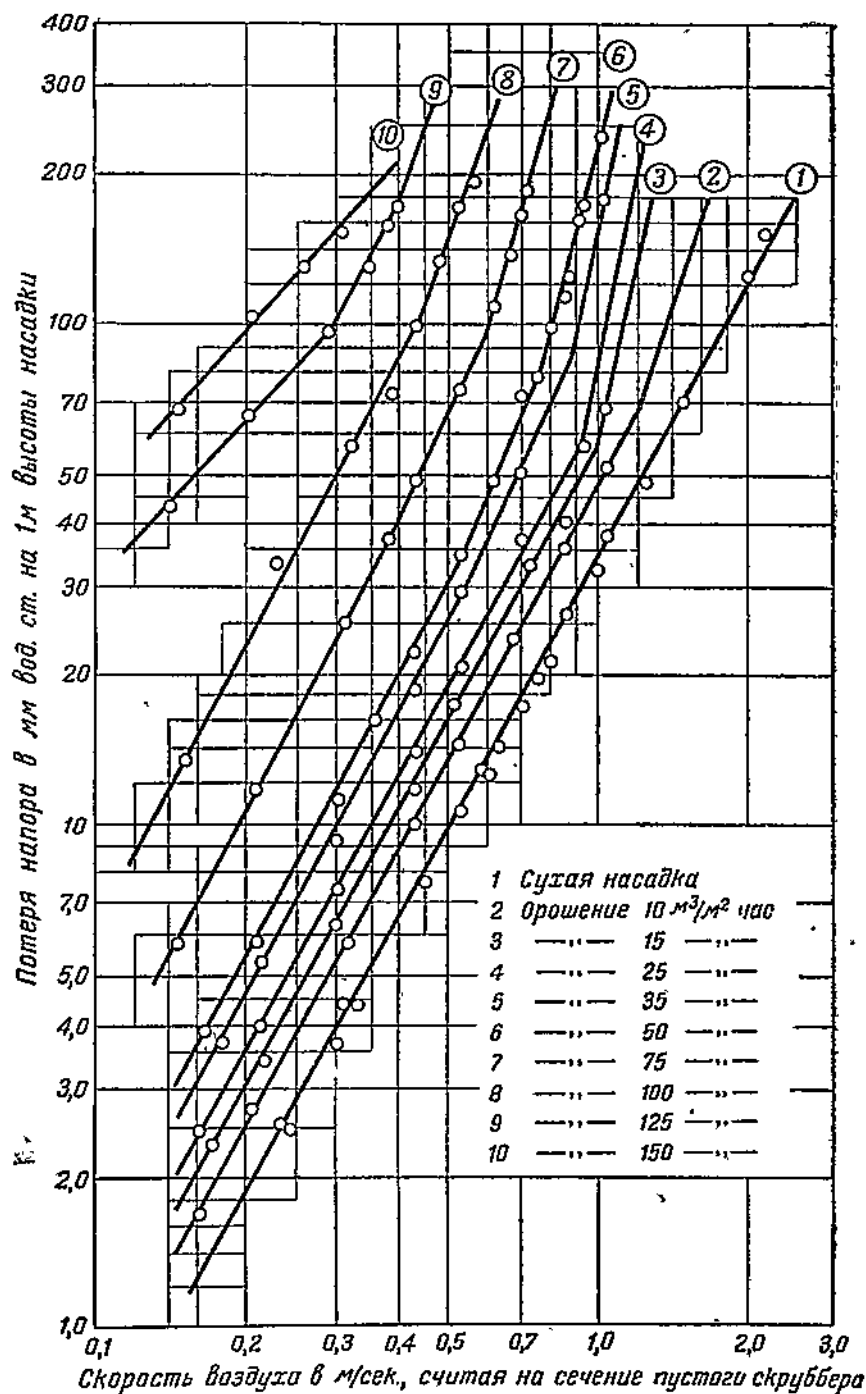


Рис. 39. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером 25×25×25 как функция скорости воздуха и плотности орошения.

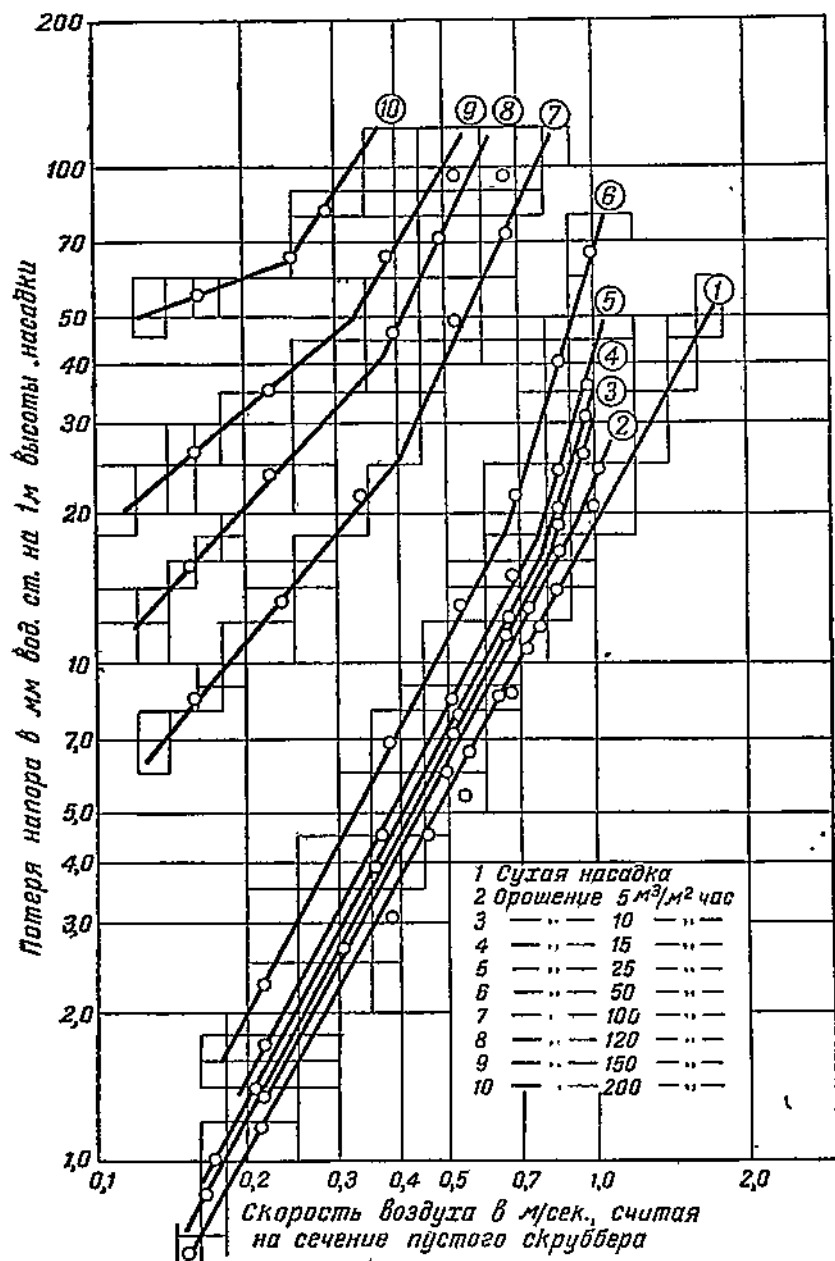


Рис. 40. Сопротивление насадки из керамических колец Рапиha размером $35 \times 35 \times 4$ мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

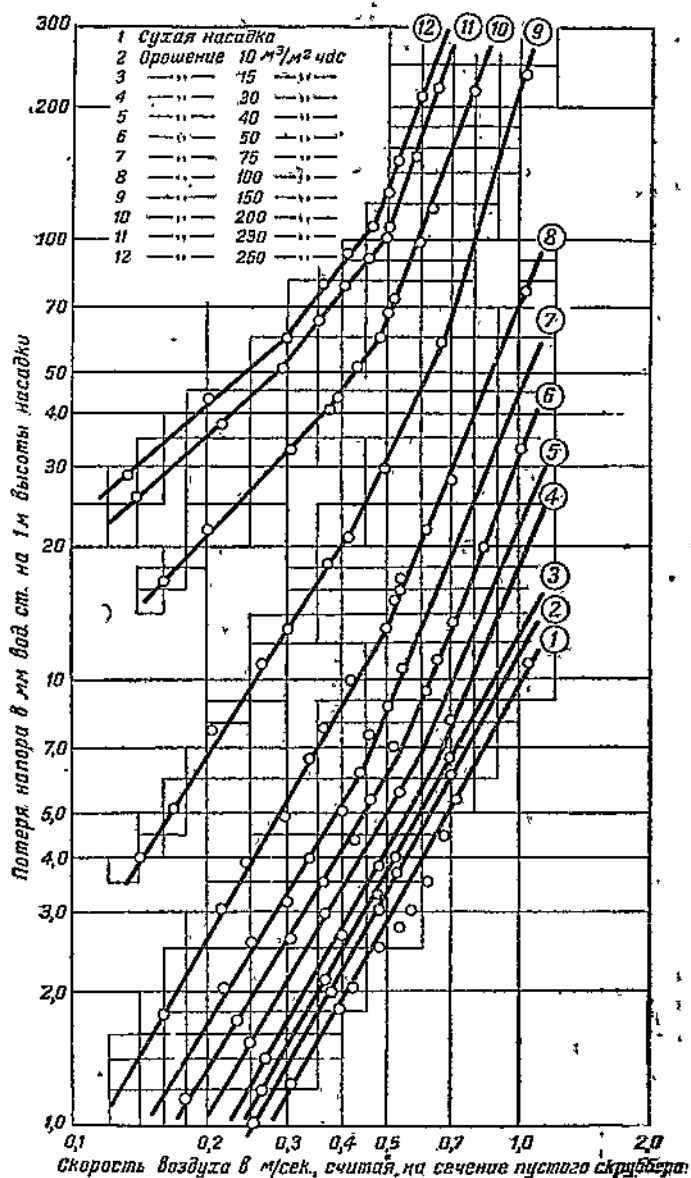


Рис. 41. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером 50×50×5 мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

даря повышению фактической скорости газового потока вследствие сужения живого сечения за счет находящейся в насадке циркулирующей жидкости, но также и потому, что газу приходится барботировать через жидкость, задерживающуюся в мертвых местах насадки (местах соприкосновения элементов насадки) и отдельных каналах.

Математически, в настоящее время затруднительно установить закономерности сопротивления скрубберных насадок и обобщить экспериментальные данные при движении газа противотоком к орошающей жидкости.

Поэтому полученные нами результаты экспериментальных определений потери напора при движении газа в различных орошаемых скрубберных насадках приводятся в виде графиков.

На графиках рис. 38—49 представлены экспериментальные данные, полученные нами в опытах с большим скруббером с $D=305$ мм при работе с системой воздух — вода.

При построении графиков 38 и 39 наряду с нашими данными использованы также данные, полученные Махом для керамических колец Рашига размером 15 и 25 мм.

В качестве единицы измерения орошения принято количество жидкости в м^3 , подаваемое на орошение в час на 1 м^2 общего поперечного сечения скруббера. С целью определения влияния физических свойств орошающей жидкости (плотность, вязкость) были проведены опыты на малом скруббере с диаметром 65 мм с применением в качестве орошающих жидкостей растворов глицерина различной концентрации, солярового масла и раствора соды. Результаты опытов представлены в графической форме на рис. 50—52.

На рис. 53 и 54 даны результаты опытов по определению сопротивления керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм и $25 \times 25 \times 3$ мм, полученные при работе на скруббере с $d=103$ мм.

Все опыты проводились в изотермических условиях при комнатной температуре.

Для сравнения на графиках приведены данные по сопротивлению сухих (неорошаемых) насадок.

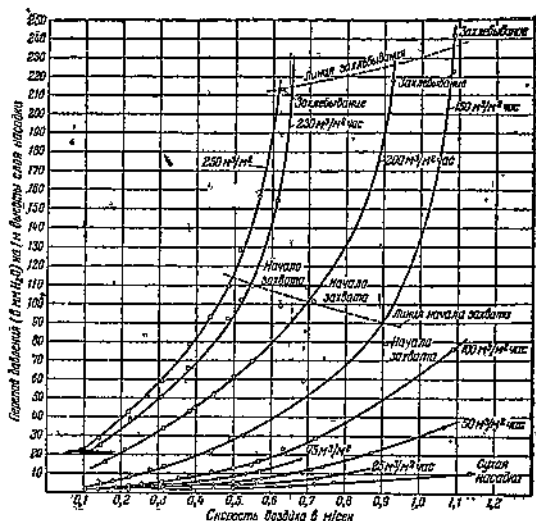


Рис. 42. Кривые изменения сопротивления насадки из керамических колец Рашига 50×50 мм в зависимости от скорости воздуха и плотности орошения.

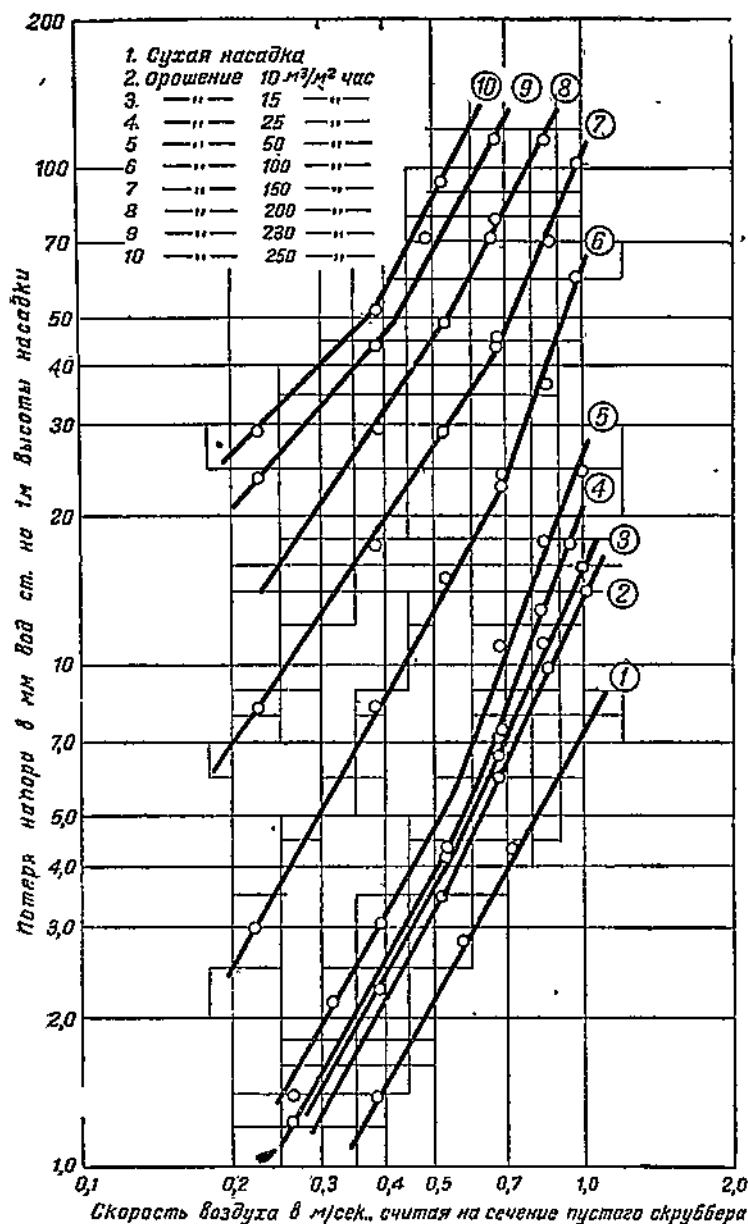


Рис. 43. Сопротивление насадки из железных колец Рашига размером $50 \times 50 \times 0,5$ мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

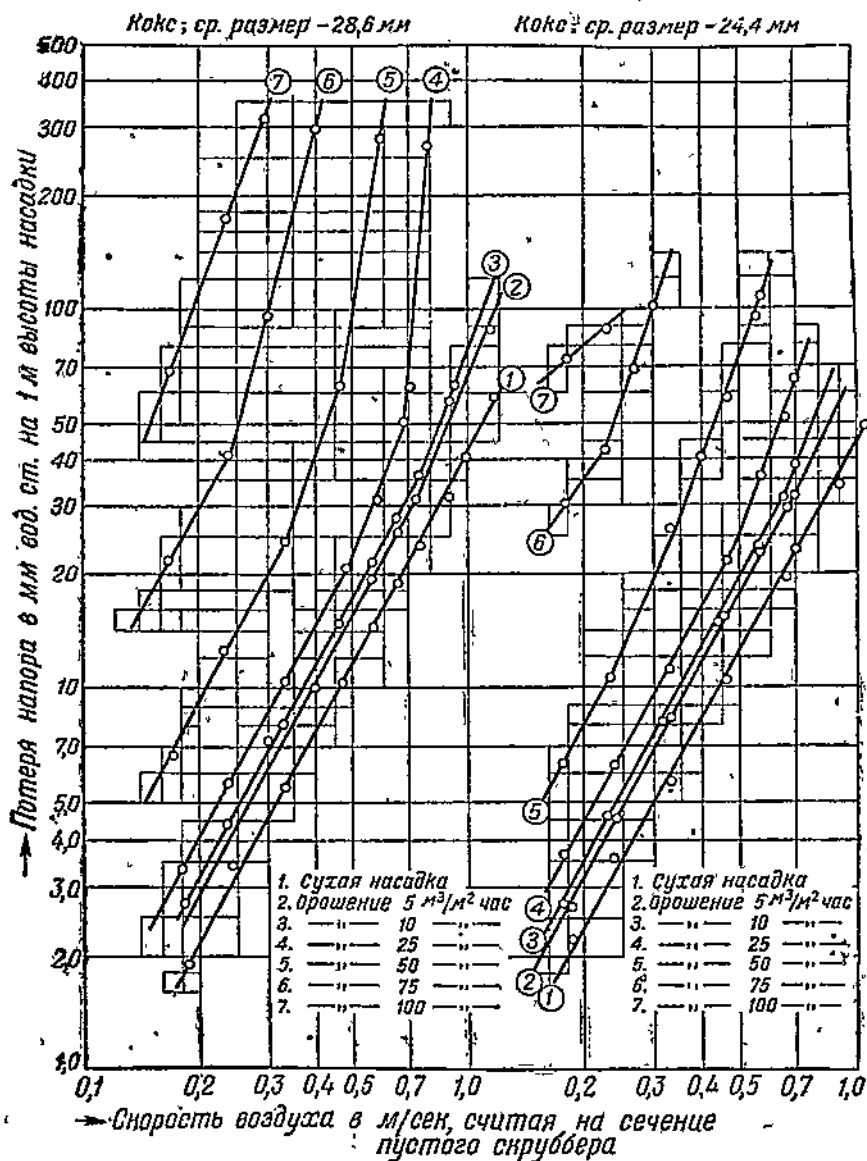


Рис. 44. Сопротивление насадки из кускового материала, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

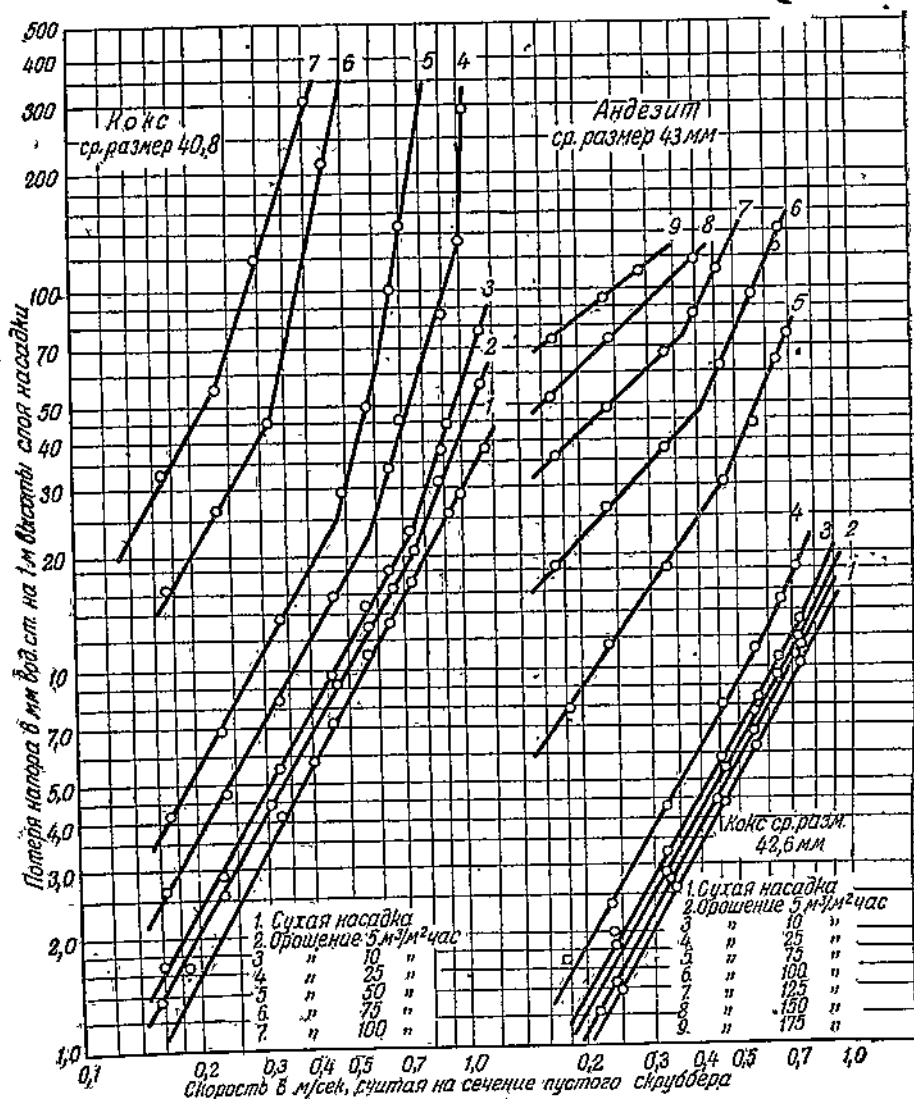


Рис. 45. Сопротивление насадок из кускового материала, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

Анализируя данные по сопротивлению орошаемых насадок, можно сделать следующее заключение:

1. Сопротивление смоченной насадки даже при отсутствии циркуляции жидкости всегда больше, чем сухой. Сопротивление возрастает по мере увеличения интенсивности орошения. Влияние интенсивности орошения на сопротивление тем больше, чем меньше

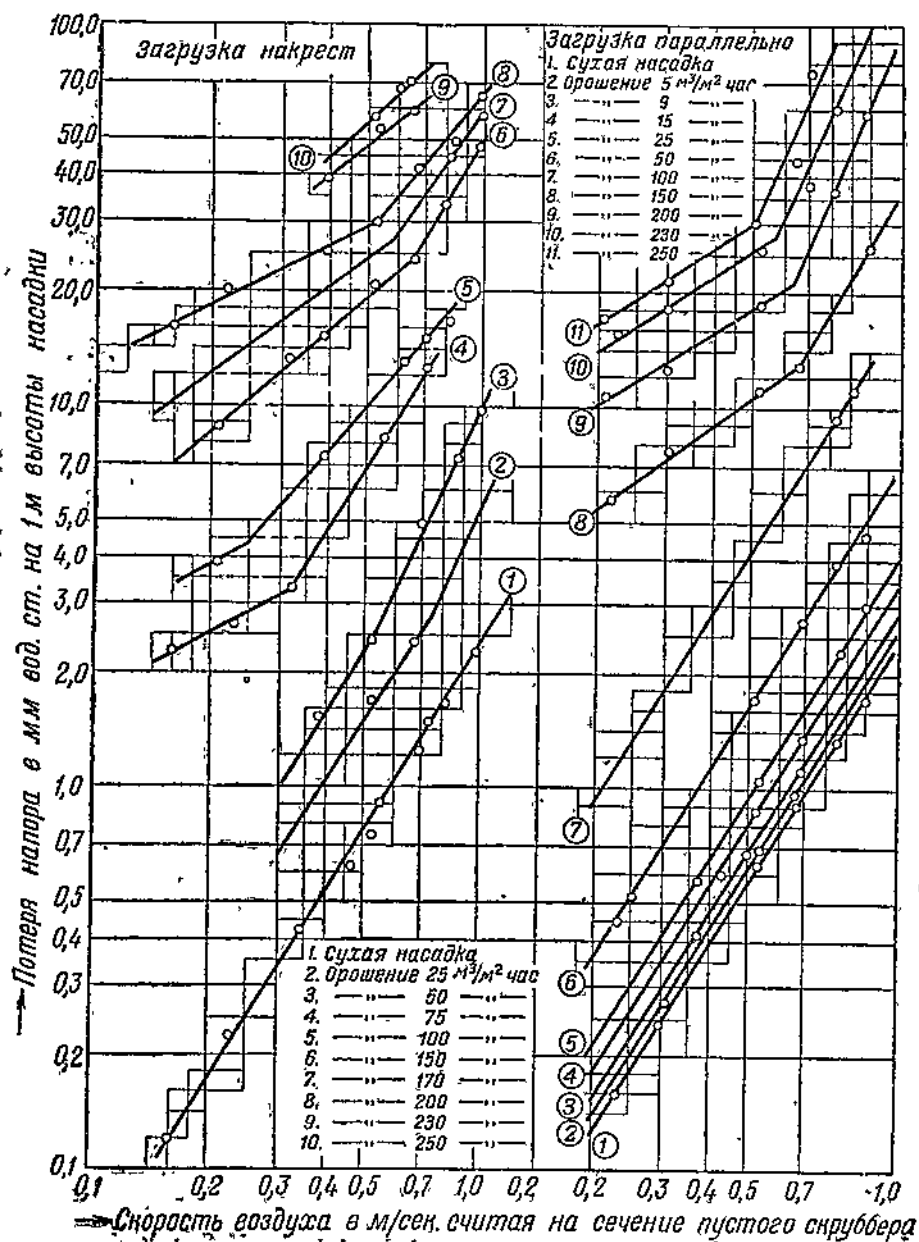


Рис. 46. Сопротивление насадки из деревянных решеток № 1, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

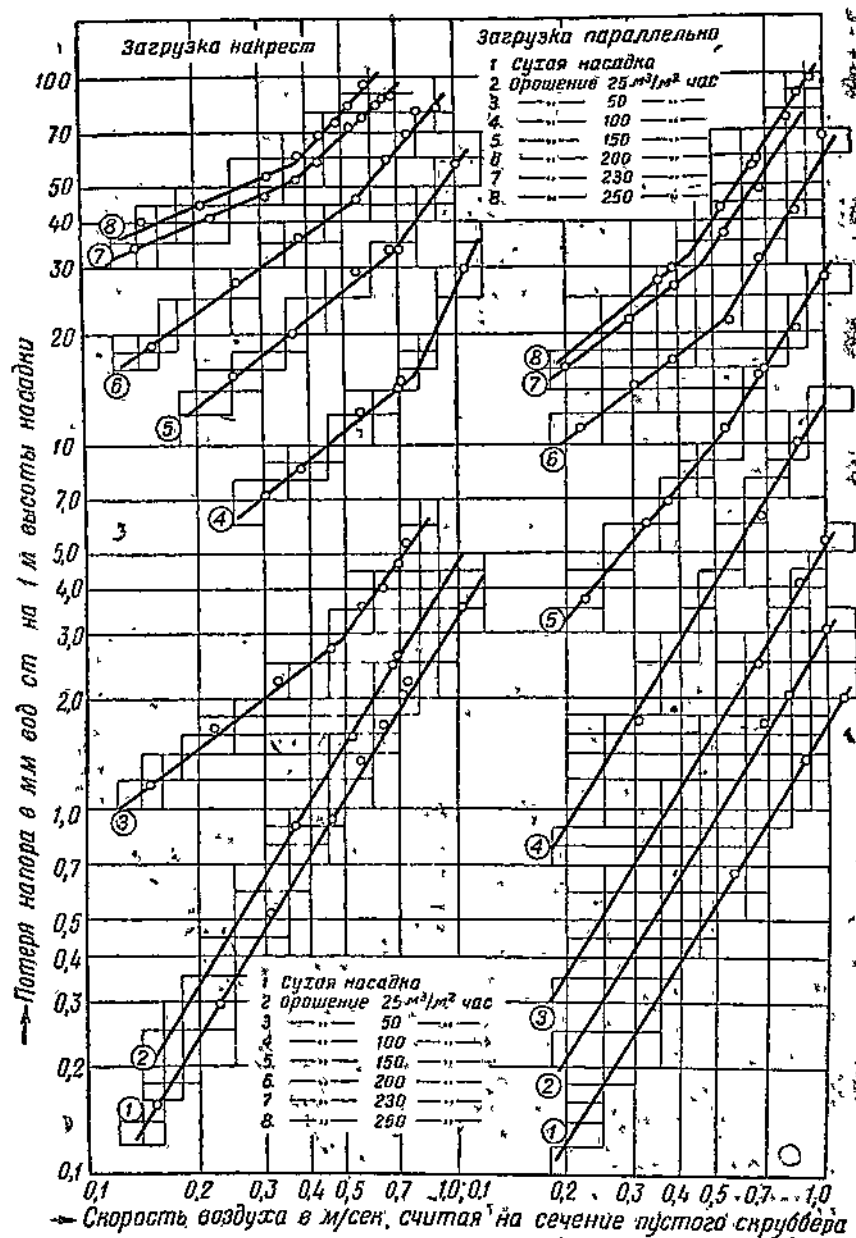


Рис. 47. Сопротивление насадки из деревянных решеток № 2, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

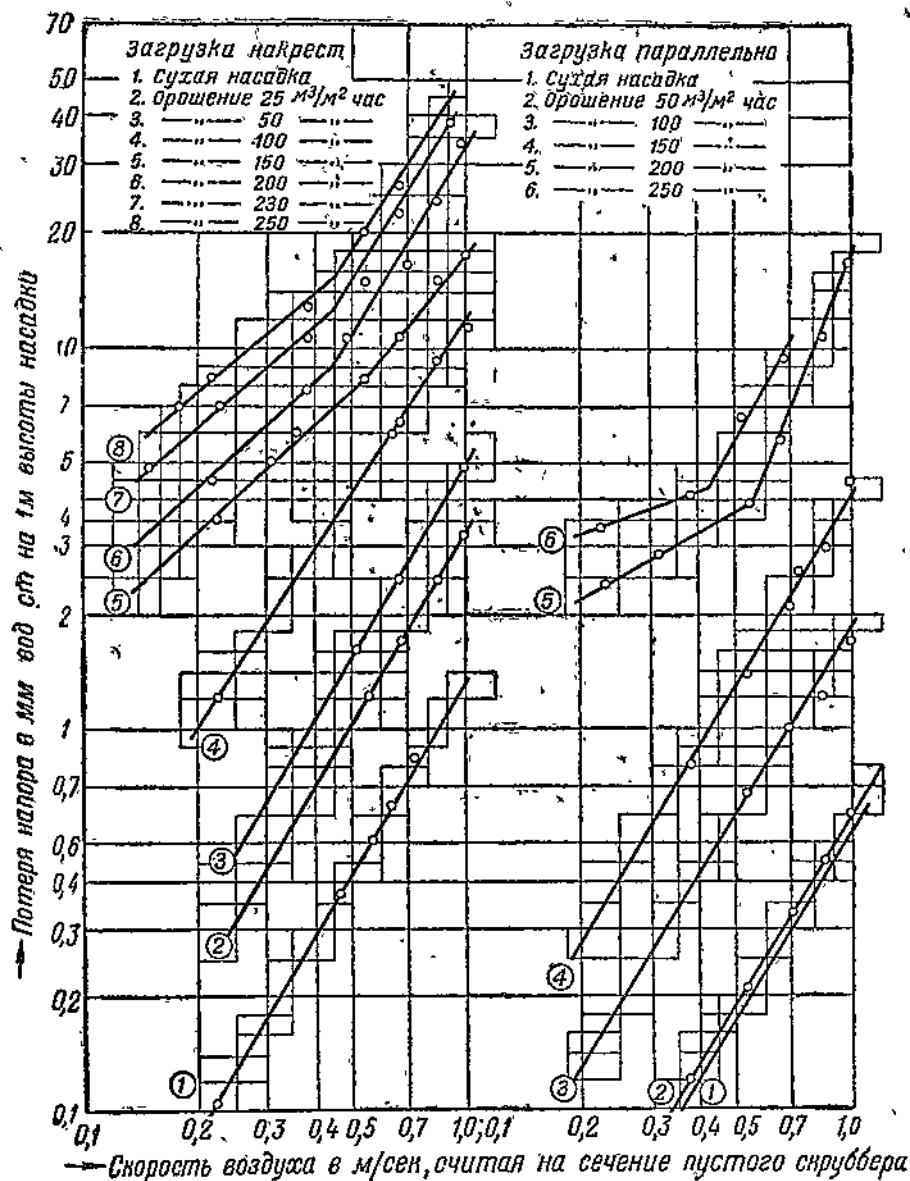


Рис. 48. Сопротивление насадки из деревянных решеток № 3, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

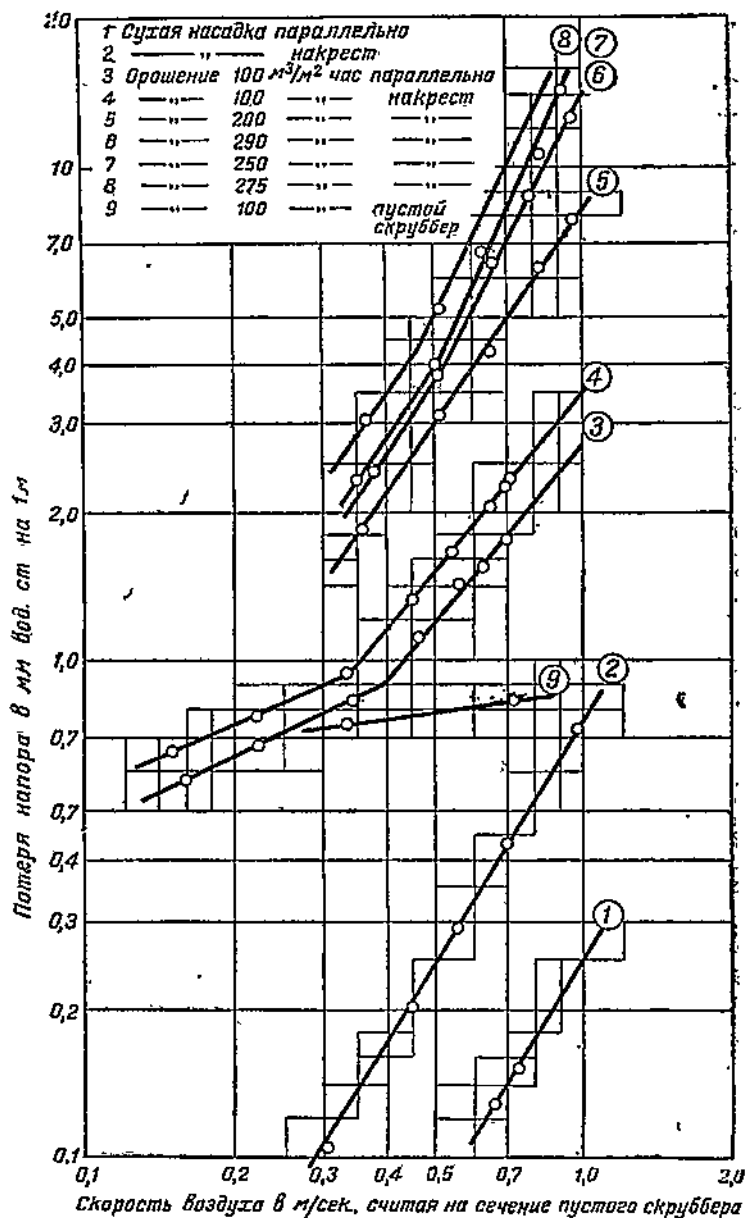


Рис. 49. Сопротивление насадки из деревянных решеток № 4, как функция скорости воздуха и плотности орошения.

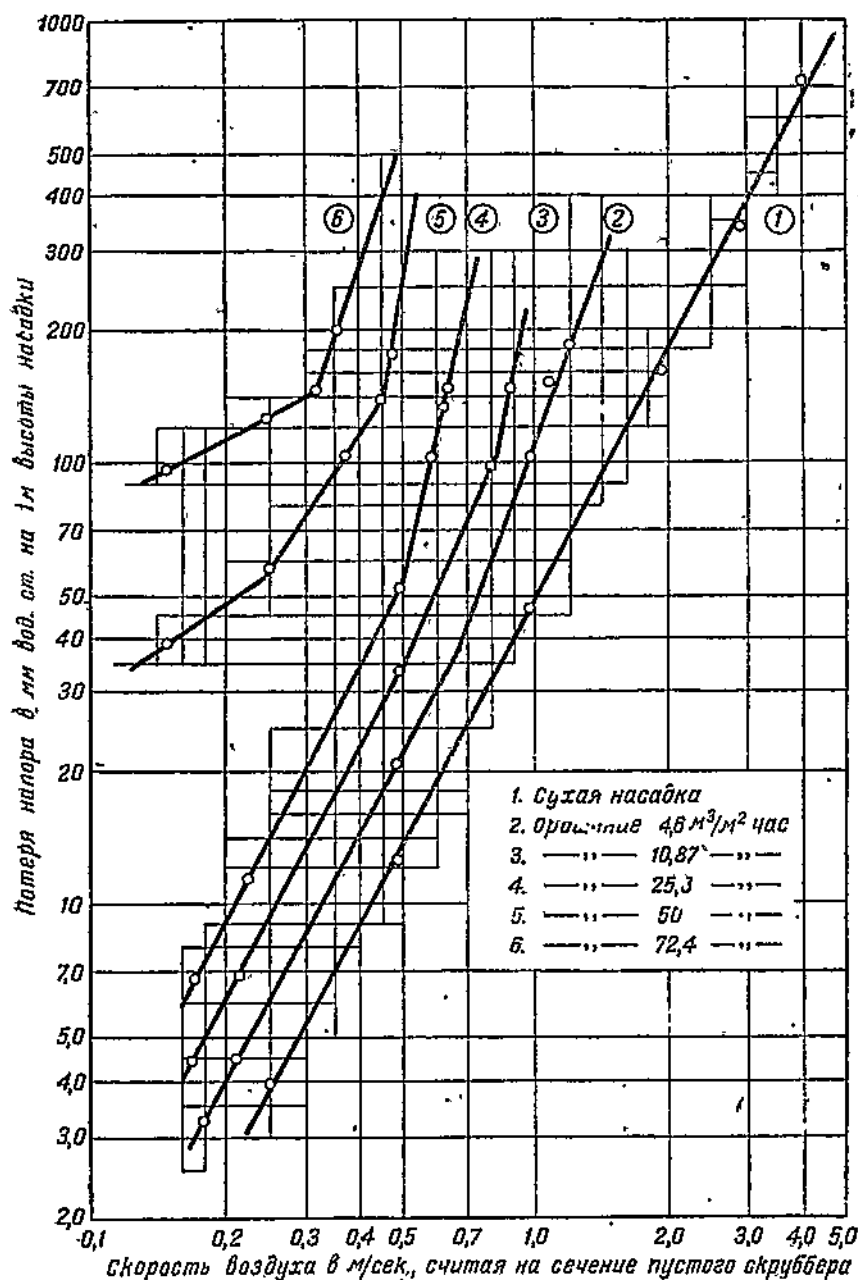


Рис. 50. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения. Скруббер $\varnothing 65$ мм. Система: воздух—вода.

размер элементов в насадке. Приращение потери напора особенно велико при малых интенсивностях орошения и постепенно уменьшается при увеличении интенсивности орошения. При больших плотностях орошения снова имеет место возрастание приращения потери напора с увеличением циркуляции жидкости.

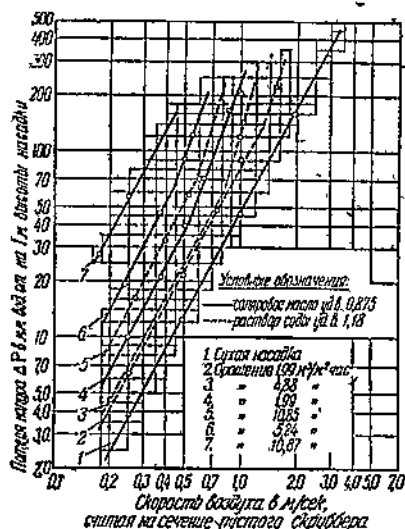


Рис. 51. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером 15×15 мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения. Скруббер $\varnothing 65$ мм. Системы: воздух—соляное масло и воздух—раствор соды.

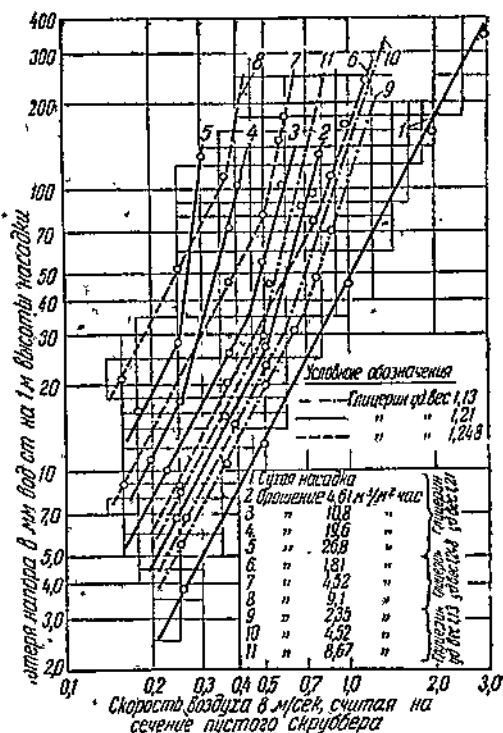


Рис. 52. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения. Скруббер $\varnothing 65$ мм. Системы: воздух—водные растворы глицерина удельного веса 1,13; 1,21; 1,248.

2. При относительно небольших плотностях орошения функциональная зависимость потери напора от скорости газа аналогична таковой для сухой насадки и на графиках в логарифмических координатах выражается прямой линией, параллельной линии для сухой насадки. Однако, это имеет место лишь до определенного предела скорости газа, которому соответствует точка перегиба прямой, после чего последняя отклоняется влево, образуя больший угол наклона к оси абсцисс. При этом сопротивление становится приблизительно пропорциональным квадрату скорости газа. При дальнейшем повышении скорости внезапно наступает второй

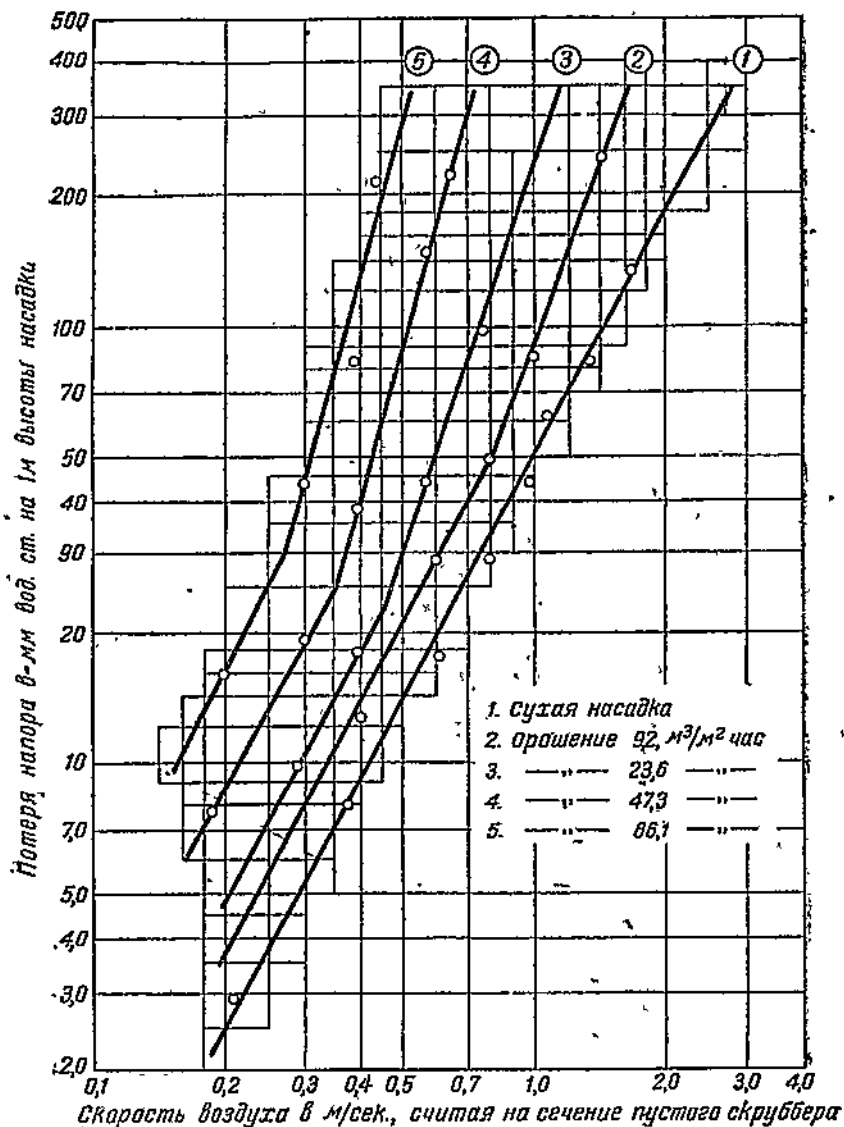


Рис. 53. Сопротивление насадки из лещ Рашнга размером $15 \times 15 \times 2 \text{ мм}$, как функция скорости воздуха и плотности орошения. Скруббер диаметром 103 мм .

перегиб прямой и сопротивление становится пропорциональным скорости в степени большей двух и начинает быстро возрастать. При больших плотностях орошения прямая становится почти перпендикулярной к оси абсцисс. При этих условиях имеет место неустой-

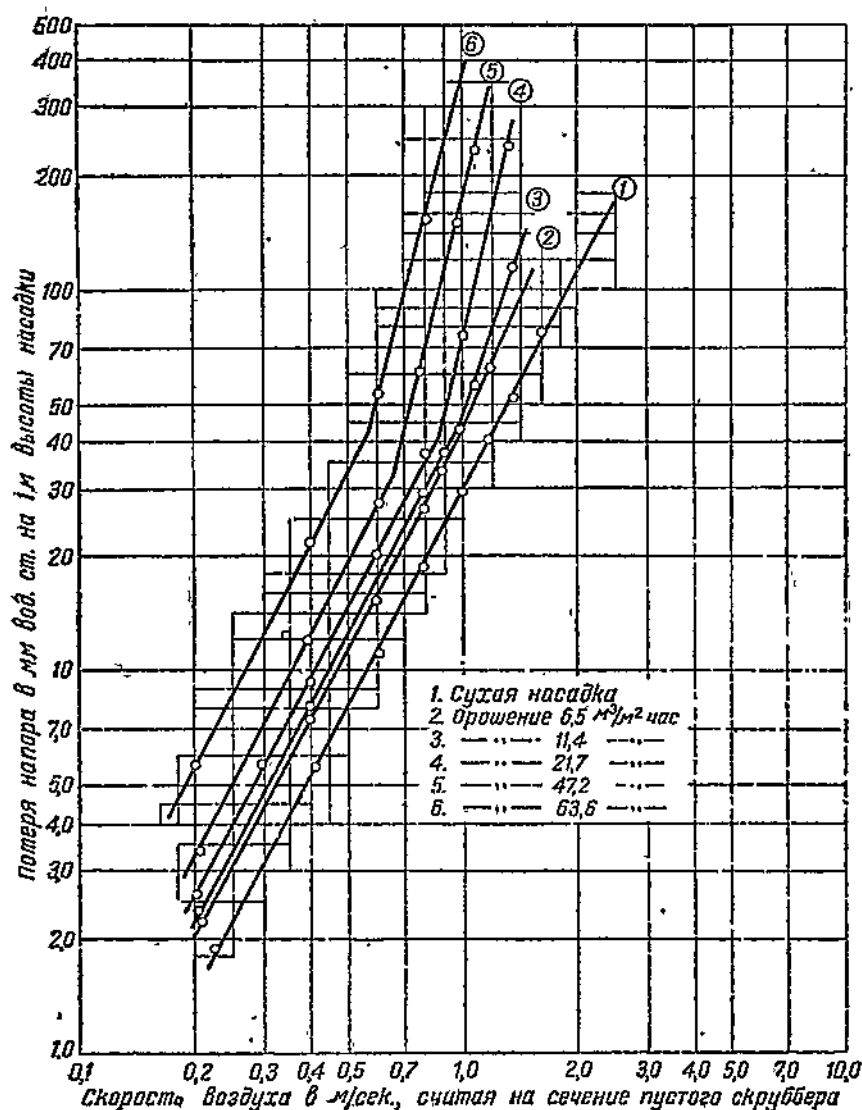


Рис. 54. Сопротивление насадки из керамических колец Рашига размером 22×25 мм, как функция скорости воздуха и плотности орошения. Скруббер— $\varnothing=103$ мм.

чивый режим работы скруббера, происходит подвигание жидкости в скруббере, затем начинается обратное течение жидкости, приводящее к захлебыванию скруббера и выбросу жидкости вместе с газом. Сильное возрастание потери напора при этом обусловлено значительным сужением каналов за счет заполняющей насадку жидкости, а также тем, что газу приходится преодолевать сопротивление барботажа.

Первую точку перегиба прямой называют точкой нагрузки скруббера (начало захвата жидкости). Вторую — точкой затопления, или правильнее, точкой захлебывания.

Практика показывает, что скрубберы и башни должны рассчитываться на работу ниже точки нагрузки и значительно ниже точки захлебывания. Знание этих скоростей, следовательно, очень важно для проектировщиков.

Точка нагрузки и точка захлебывания наступает при тем меньшей скорости газового потока, чем больше плотность орошения скруббера. Это наглядно иллюстрируется рис. 42.

3. На величину потери напора газа оказывают значительное влияние физические свойства газа и орошающей жидкости.

Сопротивление возрастает с увеличением плотности газа. Это вытекает из тех рассуждений, которые были приведены выше при рассмотрении закона сопротивления сухих скрубберных насадок. Кроме того, это подтверждается опытами Маха по сравнительному определению сопротивления потоков воздуха, светильного газа и углекислого газа.

Увеличение плотности и вязкости орошающей жидкости также приводит к возрастанию потери напора газа, что наглядно иллюстрируется графиками рис. 51 и 52. Объяснение этому заключается в том, что более вязкая жидкость в большем количестве задерживается в насадке, следствием чего является большее сужение живого сечения насадки, приводящее к большему возрастанию фактической скорости газа.

При орошении насадки жидкостью с большей плотностью газу приходится преодолевать большее гидростатическое давление при барботаже через жидкость, накапливающуюся в мертвых пространствах (местах соприкосновения элементов) и каналах насадки.

В опытах при большой интенсивности орошения было замечено засасывающее действие воды. При отсутствии противотока воздуха создается довольно значительный градиент давления между нижней и верхней частью скруббера.

С этой точки зрения в некоторых случаях выгоднее с целью уменьшения потерь энергии применять прямоток газа и жидкости. При небольших скоростях воздуха и больших плотностях орошения применение прямотока уменьшает потери напора газа примерно вдвое, причем потеря напора в орошаемой насадке может быть ниже, чем в сухой. Графики по сопротивлению орошаемых скрубберных насадок построены по опытным данным,

включающим в себя влияние засасывающего действия струй воды на падение напора газа.

Пользуясь закономерностями, установленными нами для сопротивления сухих насадок, и интерполируя данные по орошаемым насадкам, приведенные на графиках, можно рассчитать с достаточной для практических целей степенью точности сопротивление скрубберных насадок для различных условий работы. Для расчета сопротивления скрубберов, проектируемых для работы при атмосферном давлении с системами, близкими по своим физическим свойствам к системе воздух — вода, можно непосредственно пользоваться нашими данными, приведенными на графиках.

Гидравлическое сопротивление насадок при работе в неизотермических условиях

Наши опыты по определению потерь напора газа в насадках проводились в изотермических условиях при комнатной температуре. Однако, в производственных условиях иногда имеют место случаи, когда прохождение газа через насадку сопровождается охлаждением или нагреванием его. В этих случаях в величину общего падения давления необходимо вводить поправку на изменение кинетической энергии газа. Путем приближенного интегрирования уравнения Бернулли, получаем следующее выражение для падения давления, обусловливаемого разностью кинетической энергии газа на входе и выходе из насадки скруббера:

$$\Delta P' = \frac{\rho_{ср} \cdot (\bar{w}_2^2 - \bar{w}_1^2)}{2g}, \quad (62)$$

где $\Delta P'$ — падение давления, обусловленное изменением кинетической энергии газа;

$\rho_{ср}$ — средняя плотность газа;
 $\bar{w}_2$ и $\bar{w}_1$ — наивысшая и наинизшая средняя линейная скорость потока;
 g — ускорение силы тяжести.

При охлаждении газа из общей потери напора, определенной расчетным путем, необходимо вычитать падение давления, обусловленное изменением кинетической энергии; при нагревании — прибавлять.

6. ПРЕДЕЛЫ НАГРУЗКИ СКРУББЕРОВ ПО ГАЗУ И ЖИДКОСТИ

Физическая сущность явления захлебывания

Как уже было указано, производительность скруббера, т. е. предел нагрузки по газу и жидкости в условиях противотока определяется склонностью скруббера к захлебыванию. Сущность явления захлебывания состоит в том, что при определенной нагрузке скруббера по жидкости и газу, прекращается движение жидкости

в насадке сверху вниз и начинается выброс ее вместе с газом через выходной штуцер. Выбросу непосредственно предшествует подвигание орошающей жидкости в насадке и быстрое накопление ее, сопровождающееся интенсивным бурлением. При этом имеет место резкое возрастание сопротивления, являющееся следствием интенсивного барботажа и повышения фактической скорости газа за счет уменьшения живого сечения. Вслед за этим наступает обращенное течение жидкости, приводящее к выбросу.

Захлебывание скруббера является следствием механического воздействия газового потока на пленку стекающей по насадке за счет силы тяжести жидкости путем трения о ее поверхность. В случае, если направление движения газа совпадает с направлением силы тяжести (прямоток сверху вниз), это трение будет создавать дополнительную к последней движущую силу. Вследствие этого скорость течения жидкости увеличится, толщина пленки ее уменьшится и интенсивность абсорбции или теплопередачи возрастет. При движении газа снизу вверх противотоком к жидкости, т. е. обратно направлению силы тяжести, движение жидкости будет тормозиться струей газа. Это торможение усиливается по мере увеличения скорости газового потока до того момента, пока сила трения газа о жидкую пленку не уравнивает силы тяжести. Равновесию силы трения и силы тяжести соответствует подвигание жидкости в насадке, которое можно рассматривать как начало захлебывания скруббера. При дальнейшем увеличении скорости газа сила трения газа о пленку жидкости превысит силу тяжести, и пленка потечет вверх, т. е. начнется обращенное течение жидкости. При этом фактически вся жидкость, поступающая на орошение скруббера, будет выбрасываться вместе с газом в выходной штуцер, т. е. будет иметь место полное захлебывание скруббера.

Таким образом, механизм явления захлебывания скруббера сводится к появлению на внешней границе пленки жидкости, стекающей по насадке, касательных напряжений, создаваемых трением газа. Сила трения может быть выражена формулой:

$$\Delta P = \frac{f' w^2 \gamma}{2g} \cdot \kappa z / \text{м}^2.$$

Эта сила трения газа о пленку создает на ее внешней границе касательное напряжение. С другой стороны, мы можем определить это напряжение через градиент скорости в пленке и, приравняв оба выражения силы ΔP , получаем два уравнения.

Для ламинарного течения пленки:

$$\pm \frac{f' w^2 \gamma}{2g} = \mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} \right)_{y_0},$$

где y — толщина пленки жидкости.

* Строго говоря, w в этом уравнении имеет смысл относительной скорости газа. Это обстоятельство надо иметь в виду при соизмеримости w и w_x .

Для турбулентного:

$$\pm \frac{f' w_*^2 \gamma_1}{2g} = A \left(\frac{\partial w_{\infty}}{\partial y} \right) y_0,$$

где

$$A = \frac{\gamma}{g} l^2 \frac{\partial w_{\infty}}{\partial y};$$

A — коэффициент турбулентной вязкости,

l — длина пути смешения (по Прандтлю).

Знак выбирается в зависимости от направления действия силы тяжести.

Эти уравнения и отразят влияние движения газа на поведение пленки жидкости, движущейся в насадке. Первое уравнение дает критерий:

$$\frac{f' w_*^2 \gamma_1 l_0}{2g \mu w_{\infty}},$$

Второе

$$\frac{f' w_*^2 \gamma_1}{2 w_{\infty}^2 \gamma_{\infty}}.$$

Комбинируя эти критерии с Re и Fr , получаем:

$$T = \frac{f' w_*^2 \gamma_1}{2g l_0 \gamma_{\infty}}. \quad (63)$$

$Fr = \frac{w^2}{gl_0}$ — критерий Фруда является мерой отношения инерционных сил к силе тяжести; l_0 — основной линейный размер системы.

Приняв в качестве основного линейного размера системы для насадки гидравлический радиус — m , получим:

$$T = \frac{f' w_*^2 \gamma_1}{2g m \gamma_{\infty}}. \quad (63a)$$

Все величины, из которых составлен этот критерий, входят в условие однозначности и, следовательно, он является критерием определяющим. Физический смысл его ясен: он является мерой отношения сил трения газа о пленку жидкости к силе тяжести.

За определяемый критерий можно принять отношение потоков жидкости и газа — $\frac{L}{G}$,

где L — весовая скорость жидкости в $кг/м^2$ час (плотность орошения);

G — весовая скорость газа в $кг/м^2$ час (нагрузка по газу).

При обработке экспериментальных данных оказалось более удобным за определяемый критерий принять отношение потоков

жидкости и газа, умноженное на корень квадратный из отношения удельных весов газа и жидкости.

Тогда
$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{\infty}}} = \varphi(T) = \varphi \left(\frac{f' w_0^2 \gamma_1}{2 g m \gamma_{\infty}} \right) \quad (64)$$

или, выразив скорость газа через скорость, отнесенную к полному сечению скруббера, разделенную на живое сечение — $w_0 = \frac{\bar{w}_0}{\bar{F}_a}$ и гидравлический радиус как отношение живого сечения к смоченному периметру — $m = \frac{\bar{F}_a}{S}$, будем иметь:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{\infty}}} = \varphi(T) = \varphi \left(\frac{f' \bar{w}_0^2 S \gamma_1}{\bar{F}_a^3 2 g \gamma_{\infty}} \right). \quad (64a)$$

Опыт показывает, что отношение потоков жидкости и газа, соответствующее захлебыванию, является функцией характера насадки, скоростей газа и жидкости и физических свойств газа и жидкости.

Уравнение (64a) устанавливает связь между указанными факторами. В частности, фактором, определяющим влияние характера насадки на захлебывание, является безразмерный коэффициент сопротивления сухой насадки f' и основной линейный размер системы — гидравлический радиус — m .

Числовое значение f' для беспорядочно загруженной насадки определяется по графику рис. 33 или вычисляется по уравнению

$$f' = 3,8 Re^{-0,2}.$$

Уравнение (64a), однако, не включает в себя еще одного важного фактора, влияющего на захлебывание — вязкости орошающей жидкости. Вязкость газа в том интервале температур, в котором осуществляется скрубберный процесс в производственных условиях, не оказывает существенного влияния на захлебывание.

Обработка экспериментальных данных по захлебыванию скрубберов с различными насадками показала, что, если за эталон принять отношение потоков, соответствующее захлебыванию при работе с водой в качестве орошающей жидкости, то уравнение (64a) действительно для всякой орошающей жидкости с любой вязкостью, если критерий T помножить на относительную вязкость жидкости (по отношению к воде) в степени 0,2, т. е.

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{\infty}}} = \varphi(T \eta^{0,2}) = \varphi(T').$$

Для воды $\varphi(T') = \varphi(T)$.

Таким образом, универсальным уравнением, связывающим все факторы, влияющие на захлебывание, является:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{ж}}} = \varphi(T') = \varphi\left(\frac{f' \bar{w}_0^2 S \gamma_1}{\bar{F}_a^3 2g \gamma_{ж}} \eta^{0,2}\right). \quad (65)$$

Подставив в уравнение (65) значение $f' = 3,8 Re^{0,2}$ для беспорядочно загруженной насадки в условиях неустойчивого турбулентного режима, получим окончательно:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{ж}}} = \varphi(T') = \varphi\left(\frac{2,88 v^{0,2} S^1 \bar{w}_0^{1,8} \gamma_1 \eta^{0,2}}{\bar{F}_a^{3,2} 2g \gamma_{ж}}\right), \quad (65a)$$

где L — весовая скорость жидкости в $кг/м^2$ час (нагрузка по жидкости или плотность орошения);

G — весовая скорость газа в $кг/м^2$ час;

γ_2 — удельный вес газа в $кг/м^3$;

$\gamma_{ж}$ — удельный вес жидкости в $кг/м^3$;

f' — коэффициент сопротивления сухой (неорошаемой) насадки;

v — кинематическая вязкость газа в $м^2/сек$;

S — поверхность насадки в $м^2/м^3$ — величина, численно равная смоченному периметру в $м/м^2$;

$\bar{w}_0$ — средняя скорость газа в $м/сек$ (считая на полное сечение скруббера);

η — относительная вязкость орошающей жидкости (по отношению к воде);

$\bar{F}_a$ — среднее живое сечение насадки в $м^2/м^2$, численно равное свободному объему в $м^3/м^3$;

g — ускорение силы тяжести $= 9,81 м/сек^2$.

Аналогичным путем можно получить уравнение для вычисления отношения потоков, соответствующего захлебыванию для регулярно загруженной насадки, подставив в уравнение (65) соответствующее значение f' :

К уравнению (65) мы приходим также пользуясь методом безразмерного анализа.

Количество переменных, определяющих захлебывание, равно семи:

$$\frac{L}{G}, \frac{\bar{w}_0}{\bar{F}_a}, \gamma_2, \gamma_{ж}, \eta_{ж}, f' \text{ и } m = \frac{\bar{F}_a}{S}.$$

Согласно Пи-теореме при наличии семи неизвестных и только трех размерностей получается зависимость между четырьмя безразмерными комплексами, а именно:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{ж}}} = \varphi' \left(\frac{\bar{w}_0^2 S}{\bar{F}_a^3 2g} \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_{ж}} \right) \varphi''(f') \varphi'''(\eta_{ж}).$$

Комбинируя безразмерные комплексы правой части уравнения, получаем: $\odot$

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_i}{\gamma_{ж}}} = \varphi(T) \varphi'(\eta_{ж}).$$

Экспериментальным данным удовлетворяет показатель степени относительной вязкости орошающей жидкости, равный 0,2; в этом случае

$$\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_i}{\gamma_{ж}}} = \varphi(T \eta^{0,2}) = \varphi(T').$$

Экспериментальные данные и обобщение результатов

Результаты экспериментальных определений пределов нагрузки скруббера ($D = 305$ мм) при заполнении различными насадками представлены в графической форме на рис. 55. На графике для каж-

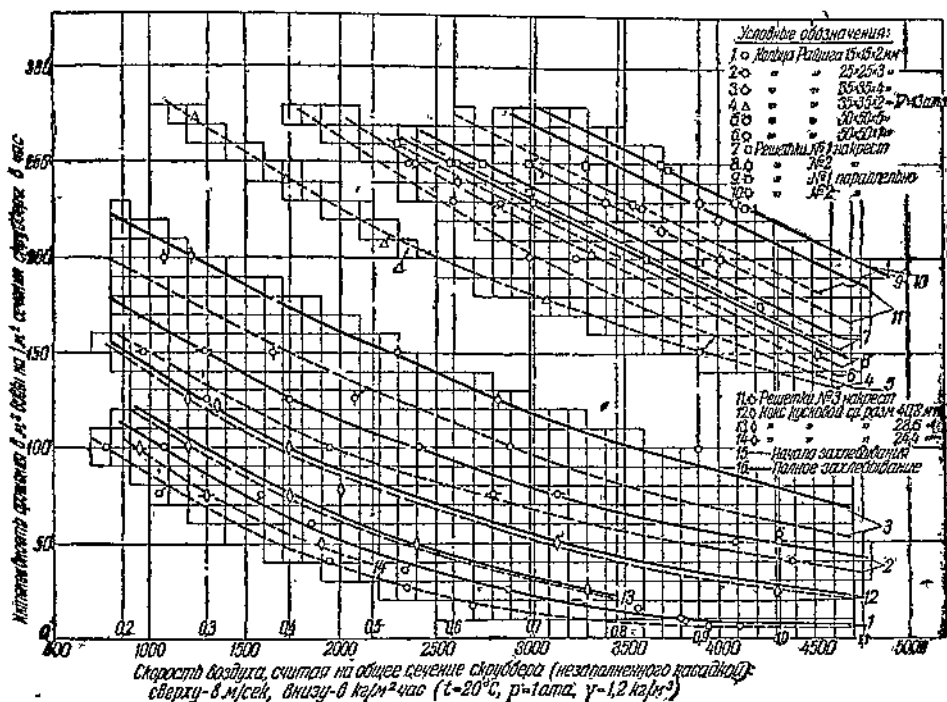


Рис. 55. Пределы интенсивности орошения скрубберных насадок в зависимости от скорости воздуха.

дой насадки приведены 2 кривые: пунктирная кривая соответствует началу захлебывания скруббера, сплошная — полному захлебыванию. Кривая 4 построена для железных колец Рашига размером $35 \times 35 \times 2$ мм по данным испытания заводского скруббера,

Результаты испытания заводского скруббера с диаметром 2 000 мм

№ п/п.	Наименование	Опыты				
		I	II	III	IV	V
1	Давление воздуха в АТИ	11,8	12,3	11,5	12	12
2	Температура воздуха °С	7	7	7	8	8
3	Количество подаваемого воздуха м³/час	2900	4000	5200	5400	7200
4	Скорость воздуха м/сек	0,0215	0,030	0,039	0,0405	0,054
5	Количество воды, подаваемой на скруббер в момент захлебыва- ния м³/час	820	720	620	580	530
6	Интенсивность потока воздуха в м³ на 1 м²/час (при 0°С и 760 мм)	970	1335	1735	1800	2400
7	Интенсивность орошения в м³ на 1 м²/час	275	242	208	195	178
8	Весовая скорость воздуха в кг/м² час	1235	1690	2200	2270	3070
9	Линейная скорость воздуха в м/сек (при 0°С и 760 мм)	0,266	0,318	0,477	—	0,662

Испытания проводились [на] скруббере с внутренним диаметром 2000 мм с высотой за-
полнения насадкой око-
ло 10 м с системой воз-
дух—вода под давлени-
ем 13 атм. Результаты
этих испытаний приве-
дены в табл. 8.

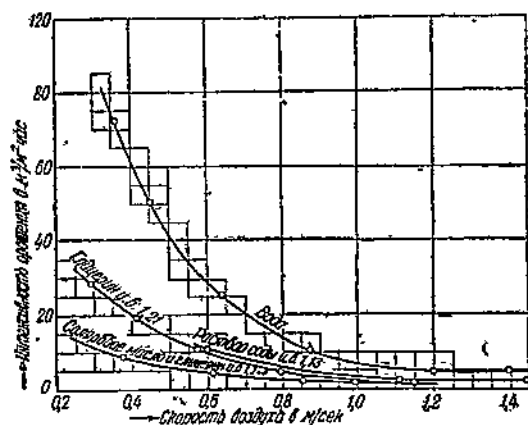


Рис. 56. — Пределы интенсивности орошения в зависимости от скорости воздуха для различных орошающих жидкостей, в скруббере $\varnothing$ 65 мм.

рина, раствор соды и соляное масло:

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Предел нагрузки скруббера (захлебывание) зависит от скоростей потоков газа и жидкости. При увеличении скорости газа снижается допустимая плотность орошения.

2. При равных скоростях газа плотность орошения, соответствующая захлебыванию, ниже при загрузке скруббера более мелкой насадкой. При одинаковых размерах элементов насадки предел нагрузки скруббера по газу и жидкости тем ниже, чем меньше свободный объем насадки.

3. Повышение давления газа повышает предел нагрузки, т. е. захлебывание скруббера наступает при более высоких плотностях орошения и скоростях газа.

4. Повышение вязкости орошающей жидкости понижает предел нагрузки скруббера.

5. Регулярно загруженная насадка имеет значительно большие пределы нагрузки, чем загруженная нерегулярно.

Обрабатывая экспериментальные данные с помощью уравнения (65) и откладывая на графике в логарифмических координатах по оси абсцисс $\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_1}{\gamma_{ж}}}$, а по оси ординат соответствующие им значения $T' = \frac{f'_{\text{вих}} \bar{w}_0^3 S}{F_a^3} \frac{\gamma_1}{2g \gamma_{ж}} \eta^{0.2}$, получаем кривую (рис. 57).

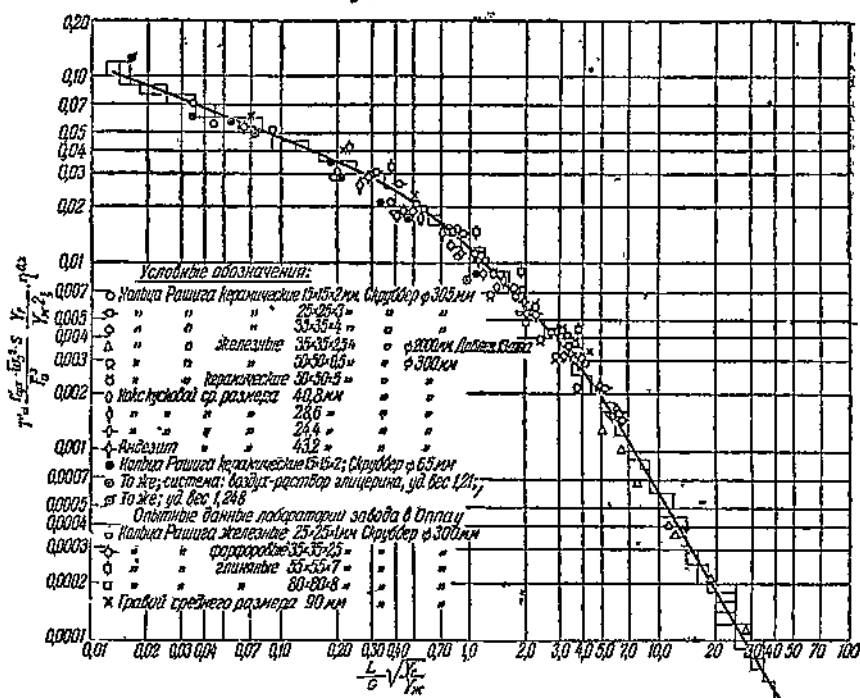


Рис. 57. Пределы нагрузки скруббера по газу и жидкости, как функция критерия T' .

Эта кривая характеризует функциональную зависимость отношения потоков жидкости и газа, соответствующего началу захлебывания скруббера, и критерия T_1 . Кривая является универсальной, действительной для всех типов и размеров насадки и, таким образом, выражает собой общую закономерность захлебывания скрубберных насадок. При построении графика были также использованы неопубликованные данные лаборатории Азотного завода в Опнау.

С помощью кривой рис. (57) и уравнений (65) и (65а) можно рассчитать предел нагрузки (захлебывание) скруббера, заполненного любой насадкой при работе с газом любой плотности и орошении жидкостью любой вязкости. Расчет производится следующим образом: зная скорость газового потока w_0 и физические константы, характеризующие насадку и обрабатываемые в скруббере газ и жидкость ($f'_{\text{срх}}$, F_a , S , η , γ_g и $\gamma_{\text{жс}}$), подставляем их значения в правую часть уравнения (65) и находим числовое значение T' .

По найденному значению T' с помощью графика 57 определяем значение $\frac{L}{G} \sqrt{\frac{\gamma_g}{\gamma_{\text{жс}}}}$, откуда по заданной нагрузке скруббера по газу G вычисляем предельную плотность орошения L , соответствующую началу захлебывания. В производственных условиях необходимо во избежание выброса жидкости из скруббера вместе с газом вести процесс при нагрузках несколько меньших, чем это соответствует началу захлебывания.

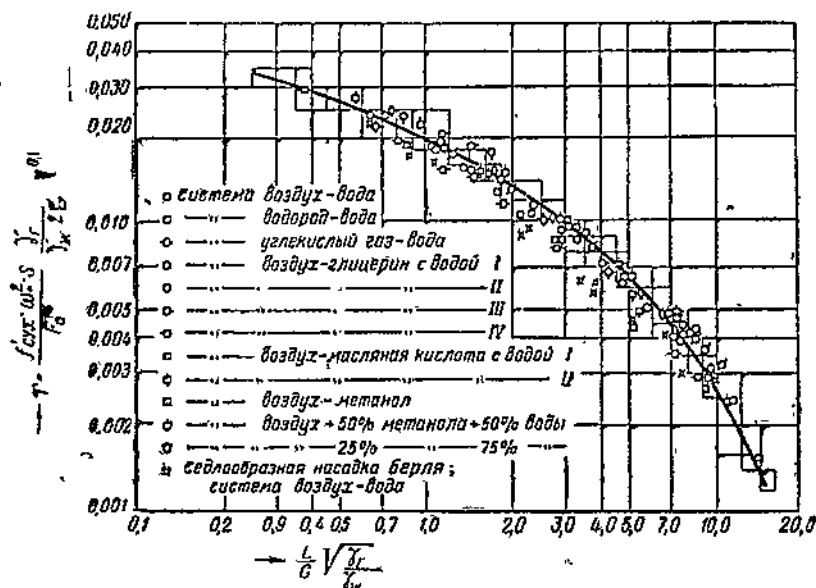


Рис. 58. Пределы нагрузки скруббера диаметром 50 мм с насадкой из 12,7-мм колец Рашига, как функция критерия T' (по данным Шервуда, Шиплея и Голлоуая).

Это обстоятельство следует учитывать, как при проектировании новых скрубберных установок, так и при интенсификации существующих. Следует иметь также в виду, что при работе с загрязненными жидкостями постепенное засорение насадки приводит к понижению пределов нагрузки.

В ректификационных насадочных колоннах, где опасность засорения насадки исключена, напротив желательно работать с нагрузками, близкими к пределу, обеспечивающими максимальную интенсивность процесса.

Наши экспериментальные данные базируются в основном на опытах с системой воздух—вода. Лишь небольшое количество опытов было проведено с жидкостями, имеющими отличную от воды вязкость. Влияние изменения плотности газа на захлебывание иллюстрируется лишь опытами на производственном скруббере под давлением 13 *атм*.

Поэтому в целях проверки правильности установленной закономерности для захлебывания скрубберов мы воспользовались экспериментальными данными упомянутой выше работы Шервуда⁵⁹. При сопоставлении нашей кривой с кривой, полученной по данным Шервуда (рис. 58), видно, что последняя располагается несколько выше нашей, но закономерность остается той же. Более высокие пределы нагрузки, полученные Шервудом, объясняются тем, что опыты проводились им в скруббере очень малого диаметра с недостаточно равномерным распределением насадки по сечению скруббера.

Кривая рис. 57 обобщает результаты для насадок любых размеров и формы, полученные в опытах в лабораторных скрубберах с диаметром 65 и 305 мм и производственном скруббере с диаметром 2000 мм, а также данные лаборатории азотного завода в Оппау. Это является достаточным доказательством того, что установленная нами зависимость между факторами, влияющими на захлебывание скруббера, имеет силу общей закономерности и может быть положена в основу проектирования промышленных скрубберных установок.

7. КОЛИЧЕСТВО ЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НАСАДКЕ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ СКРУББЕРА, И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВОБОДНЫЙ ОБЪЕМ

Во время работы скруббера, в насадке всегда имеется некоторое количество жидкости, покрывающей насадку тонким слоем. В литературе принято называть орошающую жидкость, постоянно находящуюся в насадке во время работы скруббера, жидкостью, удерживаемой насадкой. Жидкость находится в движении, в результате чего имеет место постоянное обновление поверхности контакта между жидкостью и газовой фазой.

Течение жидкости в беспорядочно загруженной насадке можно рассматривать, как течение по наклонной плоскости с непрерывно меняющимся углом наклона. Как будет показано ниже, толщина пленки жидкости, свободно текущей по наклонной плоскости, не может быть произвольной, а имеет определенное числовое значение, которое зависит от угла наклона плоскости и физических свойств жидкости (плотность и вязкость).

Исходя из этого, следует констатировать, что при полной смоченности насадки количество жидкости, находящееся в 1 м³ насадки, будет пропорционально поверхности насадки, т. е. будет тем больше, чем меньше отдельные элементы насадки.

Кроме того, в местах соприкосновения отдельных элементов насадки образуются «мешки» застойной (неподвижной или мало-подвижной) жидкости. Количество этих мешков будет больше в насадке, состоящей из более мелких элементов.

Возможность образования «мешков» застойной жидкости в регулярно загруженной насадке меньше, чем в нерегулярной.

На рис. 59 дан график зависимости количества жидкости, удерживаемой насадкой из колец Рашига различного размера при различной интенсивности орошения скруббера в отсутствии противотока воздуха. График построен по экспериментальным данным автора. Количество удерживаемой 1 м³ насадки жидкости возрастает с повышением интенсивности орошения, причем кривые показывают, что после определенного предела оно становится линейной функцией интенсивности орошения. На рис. 60 приведен аналогичный график для насадки из деревянных решеток.

Если количество удерживаемой жидкости отнести не к 1 м³ объема, занятого насадкой, а к 1 м² поверхности насадки, то все экспериментальные точки располагаются вблизи одной кривой, как это видно из рис. 61.

Количество жидкости, приходящееся на единицу поверхности насадки, будет иметь линейную размерность и численно соответствовать средней толщине пленки жидкости, стекающей по поверхности насадки

$$\frac{V_{\text{жс}}}{S} = y_0; \quad \frac{M^3 M^3}{M^3 M^2} = M,$$

где $V_{\text{жс}}$ — объем жидкости в м³, удерживаемой 1 м³ насадки.

При орошении насадки скруббера жидкостью в условиях противотока газа при малых скоростях газа и малых плотностях орошения количество жидкости, удерживаемое единицей объема насадки, остается то же, что и при отсутствии противотока газа.

При дальнейшем увеличении плотности орошения при постоянной скорости газа толщина пленки постепенно начинает увеличиваться, что сопровождается возрастанием количества жидкости, удерживаемой единицей объема насадки. При достижении определенного предела интенсивности орошения начинается быстрое накопление жидкости в насадке, приводящее к захлебыванию скруббера и наступающее тем раньше, чем выше скорость газового потока.

Это наглядно иллюстрируется графиками на рис. 62, 63 и 64. На этих графиках по оси абсцисс отложены значения плотности орошения, а на оси ординат — изменение свободного объема насадки. Кривые характеризуют изменение свободного объема различных насадок в зависимости от интенсивности орошения. Разность между свободным объемом сухой насадки и свободным объемом

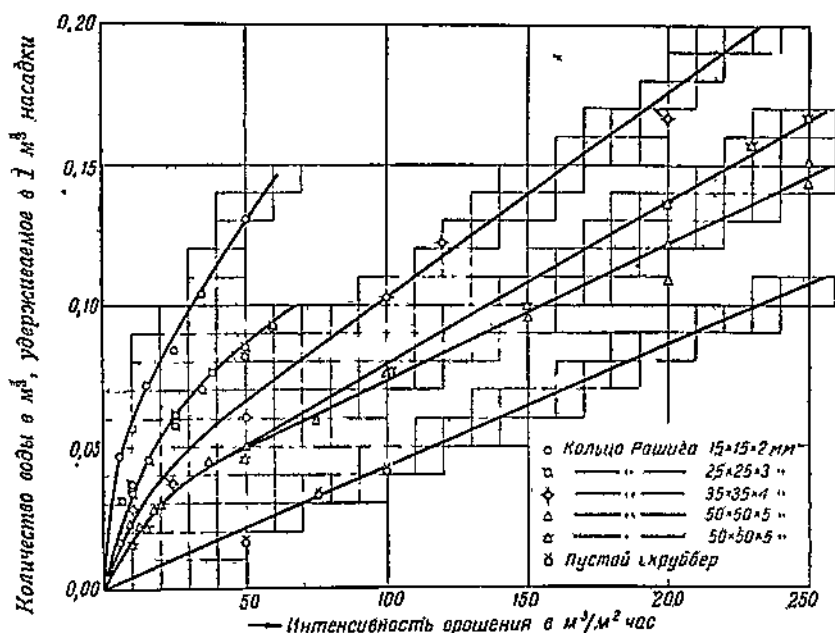


Рис. 59. Количество воды, удерживаемой насадкой из колец Рашига в зависимости от интенсивности орошения (без противотока воздуха).

насадки. при заданной интенсивности орошения представляет собой количество жидкости, удерживаемое насадкой. Как это видно из рис.64, для регулярно уложенной насадки влияние противотока воз-

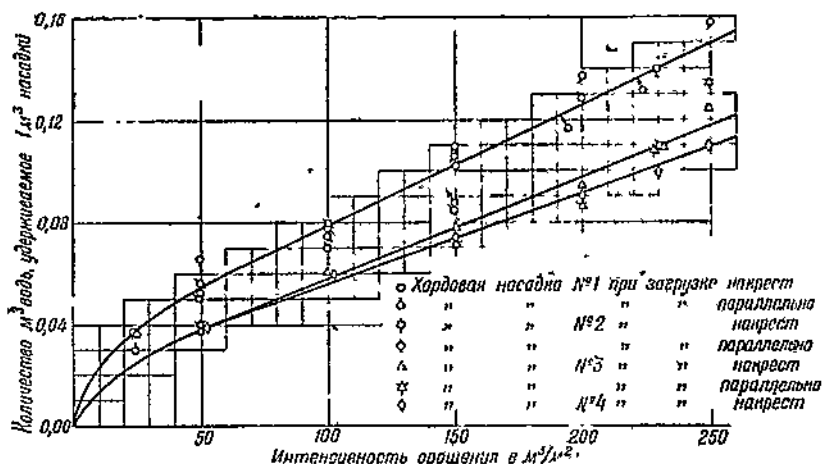


Рис. 60. Количество воды, удерживаемое 1 м^3 хордовой насадки в зависимости от интенсивности орошения (без противотока воздуха).

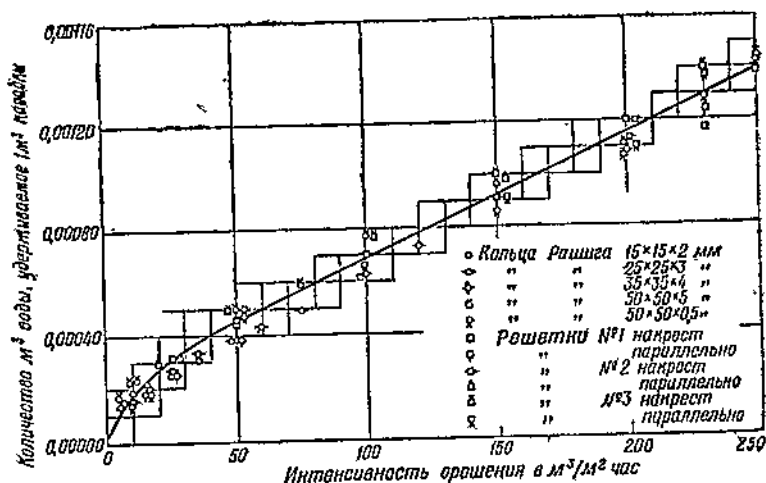


Рис. 61. Количество воды, удерживаемое 1 м^2 насадки (толщина пленки в м), в зависимости от интенсивности орошения (без противотока воздуха).

духа на количество удерживаемой жидкости проявляется при значительно больших плотностях орошения. Это влияние противотока воздуха тем меньше, чем больше свободный объем насадки. Так,

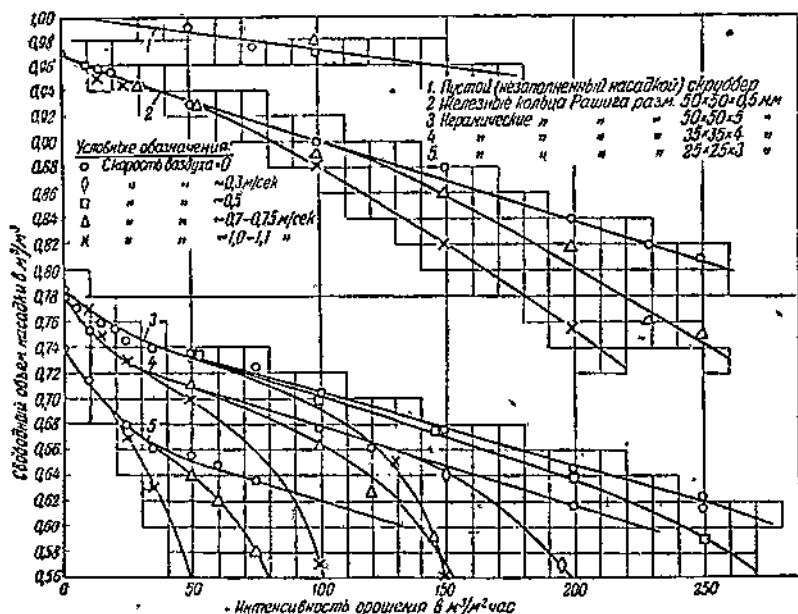


Рис. 62. График зависимости свободного объема кольцевой насадки от интенсивности орошения.

например, для насадки из решеток № 4 скорость воздуха до 1,1 м/сек практически не влияет на количество удерживаемой жидкости.

Графики 62, 63 и 64 построены по экспериментальным данным, полученным на большом скруббере, с $D = 305$ мм для системы воздух — вода.

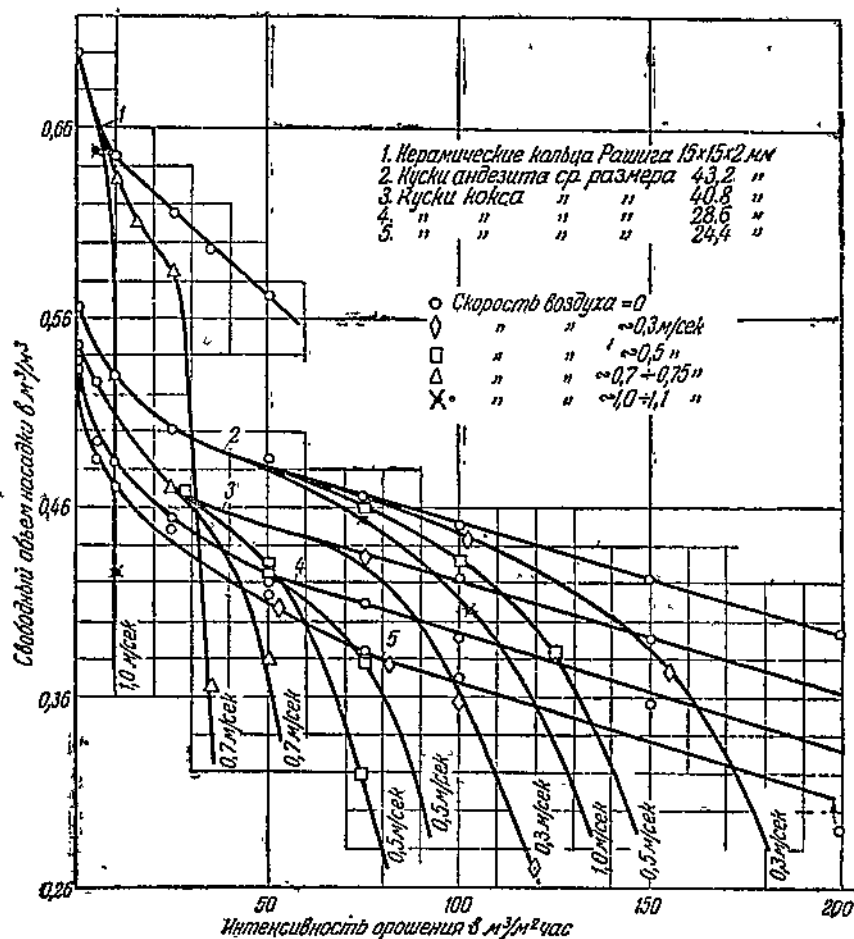


Рис. 63. График зависимости свободного объема кусковой насадки от интенсивности орошения.

Изменение свободного объема насадки из керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм при орошении ее жидкостями различной вязкости в отсутствие противотока газа по экспериментальным данным в малом скруббере, с $D = 65$ мм показано в графической форме на рис. 65.

График наглядно иллюстрирует, что при одной и той же интенсивности орошения рабочий свободный объем насадки тем меньше,

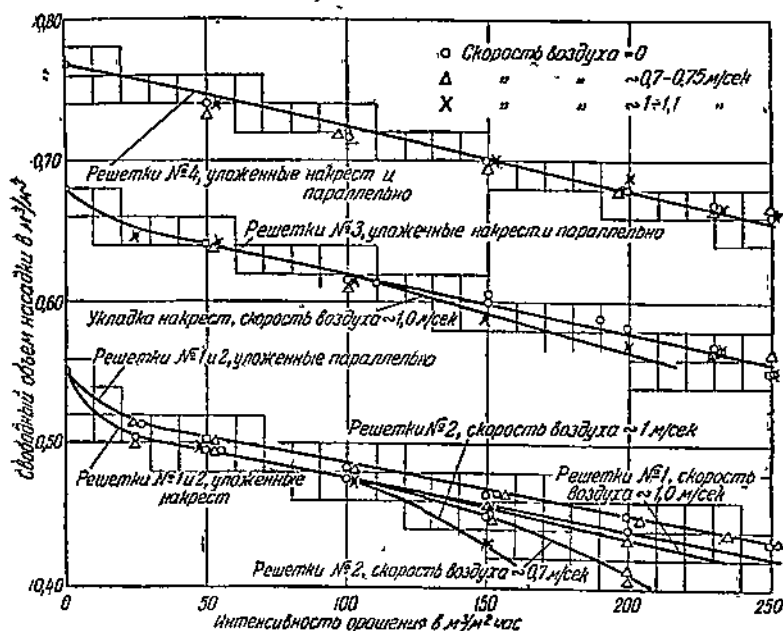


Рис. 64. График зависимости свободного объема хордовой насадки от интенсивности орошения.

чем больше вязкость орошающей жидкости, С помощью графиков и путем интерполяции приведенных в них данных можно вычислить

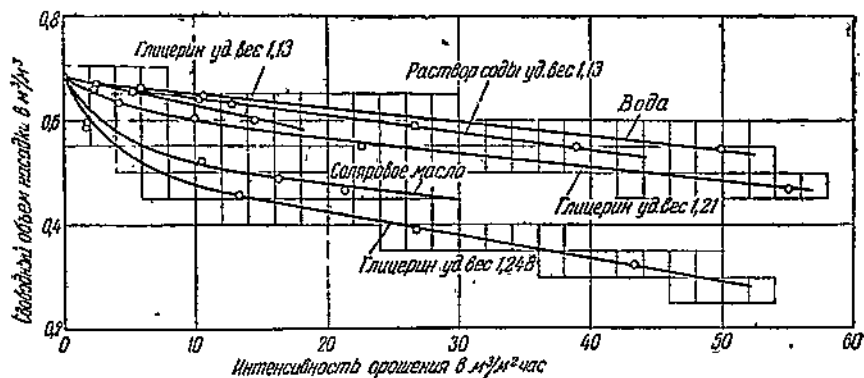


Рис. 65. График зависимости свободного объема насадки от интенсивности орошения для различных орошающих жидкостей. Скруббер $\varnothing = 65 \text{ мм}$. Кольца Рашига керамические $15 \times 15 \times 2 \text{ мм}$.

почти для всех практически важных условий работы скрубберов, рабочий свободный объем насадки и количество жидкости, заполняющей насадку.

ГЛАВА IV

АКТИВНАЯ СМОЧЕННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И СРЕДНЯЯ ТОЛЩИНА ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО НАСАДКЕ

Коэффициент полезного действия башни или скруббера с насадкой, применяемых в промышленности для проведения процессов абсорбции и теплопередачи, в значительной степени зависит от поверхности контакта жидкой и газовой фаз. Основным назначением скрубберной насадки и является создание поверхности контакта между фазами. При этом нужно иметь в виду, что не вся поверхность насадки участвует в процессе, а только активная $\frac{1}{3}$ смоченная ее часть.

Активной смоченной поверхностью в данном случае мы называем долю всей геометрической поверхности насадки, покрытую текущей пленкой жидкости. Толщина этой пленки и степень покрытия ею поверхности насадки определяется гидродинамическими условиями течения. Под этой подвижной пленкой жидкости на поверхности насадки всегда имеется неподвижный слой жидкости, связанный с поверхностью молекулярными силами. Толщина этого слоя и его свойства зависят от молекулярной природы твердой и жидкой фаз. При движении подвижной пленки имеет место скольжение ее по неподвижному слою жидкости на насадке. Степень покрытия поверхности насадки скруббера слоем текущей жидкости всегда меньше, чем покрытие неподвижным слоем жидкости. Однако, в процессах абсорбции и теплопередачи, осуществляемых в скрубберах, последний не принимает участия, поэтому вопрос о неподвижном слое жидкости на насадке в данной работе не рассматривается.

Величина активной смоченной поверхности или доля покрытия насадки текущей пленкой жидкости и равномерность распределения орошающей жидкости в насадке по сечению и высоте скруббера зависит от типа насадки, плотности орошения, скорости газа и физических свойств жидкости. Как показывает опыт, условия проведения скрубберного процесса в производстве часто не обеспечивают полноты покрытия насадки пленкой текущей жидкости и, таким образом, активная смоченная поверхность контакта фаз далеко не соответствует полной геометрической поверхности насадки. Это ведет к снижению эффективности использования скруббера.

Для проектирования скрубберных установок и обеспечения наиболее эффективного их использования весьма важно иметь данные о величине активной смоченной поверхности насадки при различных режимах процесса и знать условия, обеспечивающие полноту покрытия насадки пленкой текущей жидкости. Установление режима эксплуатации действующих скрубберов, обеспечивающего максимальную полноту покрытия насадки пленкой текущей жидкости, является одним из важнейших факторов интенсификации процесса.

Коэффициенты абсорбции и теплопередачи, с которыми приходится оперировать проектировщикам, обычно выражаются в единицах массы или тепла, передаваемых из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности.

Таким образом, поверхностью контакта является пограничный слой между текущей пленкой жидкости и движущимся газом.

Однако, полное отсутствие данных о величине активной смоченной поверхности заставляет проектировщиков вести расчет на полную геометрическую поверхность насадки, что приводит подчас к весьма неточным результатам. Непосредственное определение доли покрытия поверхности скрубберной насадки текущей пленкой жидкости для различных условий работы скруббера довольно затруднительно.

Методы определения можно разделить на две группы: прямые и косвенные.

1. ПРЯМОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ СМОЧЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАСАДКИ

Прямые методы, без сомнения, дают точные и надежные результаты, но они очень медленны и кропотливы. В литературе опубликована только одна работа, посвященная определению смоченной поверхности в башне с насадкой прямым методом выполнения Майо, Гунтер и Наш⁶³. Принятый ими метод состоял в применении бумажных колец размером 12,5×12,5 и 25×25 мм в качестве башенной насадки с водным раствором водорастворимой краски в качестве орошающей жидкости.

Данные о бумажных кольцах

Размеры колец в мм	5×12,5	1225×25
Количество колец в 1 м ³	342 000	44 000
Поверхность м ² /м ³	347	178
Свободный объем	92,0	93,0

Кольца состояли из двух слоев бумаги. После опыта для измерения смоченной окрашенной поверхности колец каждое кольцо разрезалось на две части — наружную и внутреннюю. Затем окрашенные части каждой из этих частей вырезались ножницами, после чего окрашенные и не окрашенные части всех колец взвешивались, причем предполагалось, что полученные веса пропорциональны смоченной и не смоченной части.

Опыты проводились в стеклянной башне, имеющей диаметр 75 мм и высоту 1200 мм, которая с помощью насоса орошалась под-

крашенной водой. Была предусмотрена также возможность подачи в башню воздуха снизу противотоком к орошающей жидкости. Количество поступающих в башню жидкости и воздуха тщательно измерялось и могло регулироваться с помощью соответствующих байпасов.

Перед опытом насадка из бумажных колец в беспорядке загружалась в цилиндр или трубку из жесткой бумаги такой же длины, как башня, и цилиндр вставлялся внутрь башни. Днище бумажного цилиндра состояло из крупной проволочной сетки для поддержания колец. После опыта бумажный цилиндр вынимался, высушивался в токе теплого воздуха, разрезался на ряд секций по высоте и затем определялась доля окрашенной (смоченной) поверхности стенок цилиндра и колец в отдельных секциях и по всей высоте цилиндра в целом. Во время опыта орошающую жидкость вначале пускали циркулировать по байпасной линии с целью отрегулировать скорость потока до желаемого предела. Когда поток становился постоянным, орошающая жидкость направлялась в башню и циркулировала в ней в течение 10 минут в каждом опыте. Было установлено, что в течение этого времени смачивание достигало максимума и дальнейшая циркуляция не приводила к увеличению доли смоченной поверхности.

Изменение доли смоченной поверхности по высоте башни

На рис. 66 изображены в графической форме результаты опытов в башне с диаметром 75 мм, заполненной кольцами размером $12,5 \times 12,5$ мм слоем высотой 750 мм. На графике по оси абсцисс отложе-

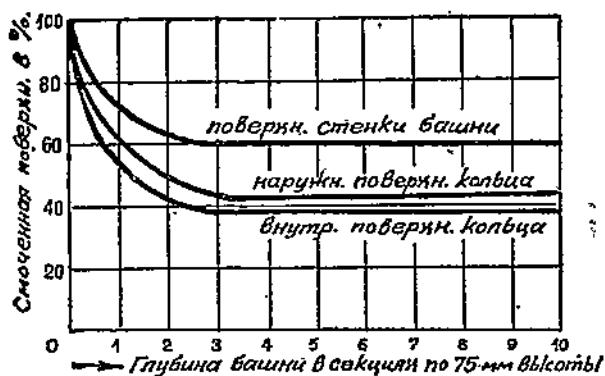


Рис. 66. График изменения процента смоченной поверхности по высоте башни (по данным Майо, Гунтера и Наша).

ны номера секций насадки по высоте, причем цифрой 1 обозначена первая секция сверху, а цифрой 10—последняя. Высота каждой секции составляла 75 мм. По оси ординат отложен процент смоченной поверхности. Три кривых графика дают представление о проценте смоченной поверхности: стенок башни, наружной поверх-

ности колец и внутренней поверхности колец. Наибольший процент смоченной поверхности показали стенки башни, что свидетельствует о тенденции жидкости стекать постепенно от центра к стенкам башни. Опыт проводился без противотока воздуха с равномерным орошением верхнего слоя колец небольшим количеством жидкости с помощью перфорированного диска по всему сечению башни. Наибольший процент смоченной поверхности колец оказался в верхней секции насадки непосредственно под распределителем жидкости. По мере того, как жидкость стекает вниз, повидаемому, образуется значительное количество каналов, и в результате постепенно уменьшается процент смоченной поверхности колец и стенок башни. Внутренняя поверхность колец, как показывает рис. 66, имеет меньший процент смоченной поверхности, чем внешняя.

Влияние скорости орошающей жидкости (плотности орошения) и скорости газа на долю смоченной поверхности насадки

Влияние плотности орошения на величину смоченной поверхности насадки по опытам Майо с сотрудниками в башне диаметром 75 мм с насадкой из колец размером 12,5×12,5 мм показано на

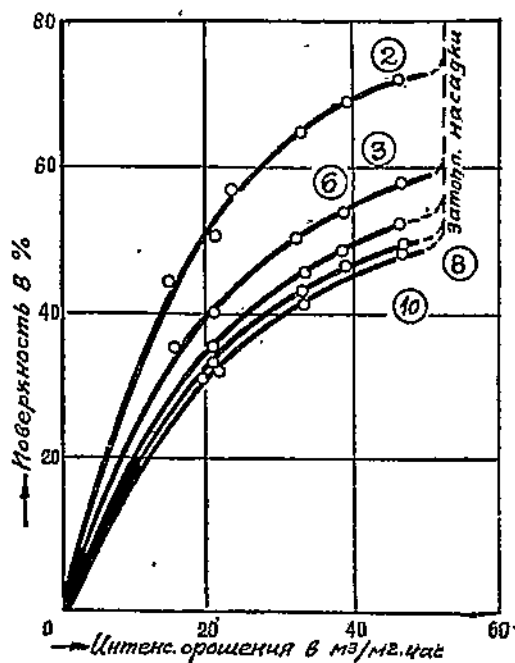


рис. 67. На оси абсцисс отложена интенсивность орошения в $\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$, а на оси ординат — процент смоченной поверхности. Кривые характеризуют собой изменение доли смоченной поверхности (в %) для участков башни по высоте с различным отношением высоты башни H к диаметру D .

Из рис. 67 видно, что при равномерном орошении верхнего слоя насадки процент смоченной поверхности постепенно уменьшается (считая сверху) с увеличением $\frac{H}{D}$ (от 2 до 10).

С увеличением интенсивности орошения доля смоченной поверхности постепенно увеличивается, пока не достигается плотность орошения, при которой насадка внезапно заполняется жидкостью

Рис. 67. График изменения процента смоченной поверхности насадки в зависимости от интенсивности орошения и отношения $\frac{H}{D}$ — высоты башни к диаметру (по данным Майо, Гунтера и Наша).

на всю высоту слоя. Для насадки из 12,5-мм колец это произошло при плотности орошения приблизительно равной $53 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ (точка заливания), причем вся поверхность насадки и стенок скруббера оказалась смоченной.

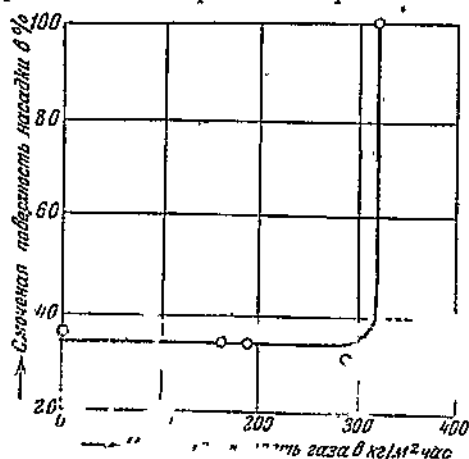


Рис. 68. График изменения процента смоченной поверхности насадки из колец размером 12,5 мм при интенсивности орошения $21 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ в зависимости от массовой скорости воздуха (по данным Майо, Гунтера и Наша).

На рис. 68 показано влияние противотока газа на долю смоченной поверхности для колец размером 12,5 мм при интенсивности орошения $21 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$. Из графика рис. 68 видно, что противоток газа существенно не влияет на долю смоченной поверхности, которая остается постоянной, пока не наступает захлебывание, соответствующее резкому повышению доли смоченной поверхности (поворот кривой вверх).

Средняя толщина пленки жидкости, стекающей по насадке

Среднюю толщину пленки жидкости, стекающей по насадке, можно определить путем деления количества жидкости, находящейся во время работы башни на поверхности насадки, на смоченную поверхность насадки.

Проведя определение количества удерживаемой насадкой жидкости методом мгновенной отсечки питания и измерения стекающей с насадки жидкости, Майо с сотрудниками параллельно с определением доли смоченной поверхности обнаружили, что средняя толщина жидкостной пленки на поверхности насадки постоянна. Результаты измерений представлены на рис. 69. Кривая средней толщины пленки, как функция массовой скорости жидкости (плотности

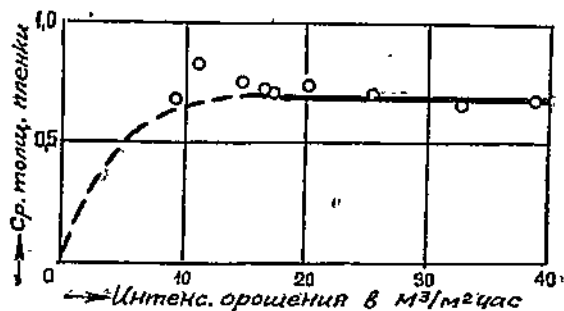


Рис. 69. Средняя толщина пленки жидкости, покрывающей поверхность насадки, при различной интенсивности орошения (по данным Майо, Гунтера и Наша).

обнаружили, что средняя толщина жидкостной пленки на поверхности насадки постоянна. Результаты измерений представлены на рис. 69. Кривая средней толщины пленки, как функция массовой скорости жидкости (плотности

орошения) проходит, как показывает пунктирная линия, при нулевой плотности орошения через ноль и становится при повышении интенсивности орошения параллельной оси абсцисс. Толщина пленки при этом оказывается равной приблизительно 0,7 мм. Это свидетельствует о том, что увеличение интенсивности орошения в башне с насадкой вызывает увеличение смоченной поверхности на количество, необходимое для поддержания постоянной средней толщины пленки жидкости.

Однако, как указывалось нами выше, в башнях с насадкой, применяемых для процессов абсорбции и теплопередачи, не вся смоченная поверхность является одинаково активной. Только поверхность пленки жидкости, находящейся в движении, является активной. Поверхность неподвижной жидкости, так называемых

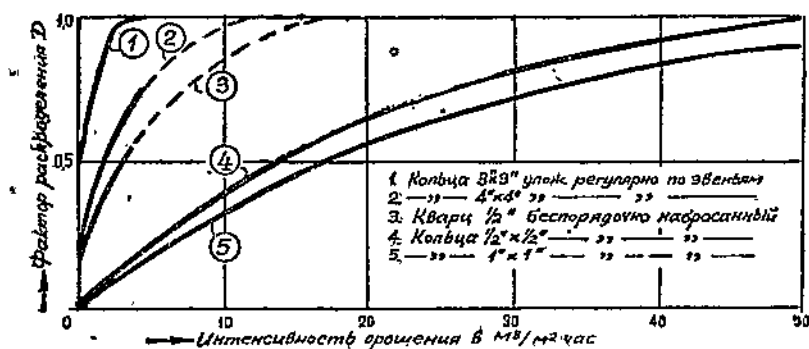


Рис. 70. График зависимости фактора распределения жидкости в насадке (D) от интенсивности орошения (по данным Ковальке, Хоугена и Ватсона).

«мешков», активна лишь до тех пор, пока этот «мешок» не будет насыщен абсорбируемым веществом; затем эта поверхность теряет свою активность. Этот процесс происходит сравнительно быстро и для всяких практических целей неподвижные поверхности жидкости в насадке можно рассматривать как неактивные. На образование неподвижных «мешков» расходуется большее количество жидкости на единицу смоченной поверхности, чем на образование подвижной пленки.

Майо с сотрудниками, сопоставляя некоторые данные других исследователей, пришел к заключению, что приблизительно 10% всей смоченной поверхности является неактивной вследствие образования неподвижных «мешков» с жидкостью из-за капиллярного задерживания в точках контакта элементов насадки.

Ковальке, Хоуген и Ватсон⁷³, исследуя абсорбцию аммиака водой в башнях с насадкой, измеряли фактор распределения D , который представляет отношение между действительно активной смоченной поверхностью и максимальной смоченной поверхностью, достигаемой при высоких массовых скоростях воды. Таким образом, D является прежде всего функцией массовой скорости орошаю-

щей жидкости и приближается к единице при высоких скоростях потока жидкости. На рис. 70 изображен фактор распределения D , как функции интенсивности орошения. На графике наряду с данными Ковальке, Хоуген и Ватсон даны также результаты Майо, Гунтера и Наша для колец Рашига размером 12,5 и 25 мм.

Сравнивая эти данные, можно видеть, что при насадке из волнистых и гладких колец, уложенных правильными рядами, максимальная величина D достигается при очень низких массовых скоростях жидкости. Это свидетельствует о том, что при правильной укладке колец покрытие насадки пленкой текущей жидкости осуществляется легче.

График рис. 70 показывает также, что распределение жидкости в кусковой насадке лучше, чем в загруженных в беспорядке кольцах. При волнистых кольцах Ковальке, Хоуген и Ватсон нашли, что D является функцией скорости газа и жидкости, но при наличии гладких колец и кусковой насадки он не зависит от скорости газа, как это установлено Майо.

Исследование Майо, Гунтера и Наша не претендует на большую строгость, и авторы не делают попытки выразить полученные результаты в количественно точных математических выражениях. Тем не менее оно приближает к решению вопроса об определении величины активной смоченной поверхности насадки.

Для проверки и уточнения данных, полученных Майо с сотрудниками, нами было предпринято исследование, имеющее целью решение того же вопроса косвенным путем.

Одним из наиболее простых путей является следующий. Если имеются данные о количестве жидкости, удерживаемой насадкой при определенных условиях работы скруббера, то, зная среднюю толщину пленки жидкости, стекающей по насадке, можно рассчитать величину поверхности, покрытой пленкой текущей жидкости, и процентную долю ее от общей геометрической поверхности насадки.

Жидкость, свободно стекающая по наклонной плоскости, движется слоем определенной толщины, причем толщина слоя определяется гидродинамическими условиями течения. Течение жидкости в беспорядочно загруженной насадке скруббера приближенно можно рассматривать как движение ее по большому количеству плоскостей с непрерывно меняющимся углом наклона к горизонту. Поэтому сведения о толщине пленки жидкости, свободно стекающей по наклонной плоскости, дают нам некоторое представление о характере движения жидкости в насадке и позволяют приближенно вычислить величину смоченной поверхности.

2. СРЕДНЯЯ ТОЛЩИНА ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПРИ СВОБОДНОМ ТЕЧЕНИИ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Теоретические предпосылки и обзор литературы

Применительно к цели данного исследования нами была поставлена частная задача — определить толщину пленки жидкости;

свободно стекающей по наклонной плоскости, в зависимости от угла наклона и физических свойств жидкости (плотность, вязкость).

При наличии свободной поверхности для характеристики движения жидкости по наклонной плоскости может быть применена известная формула Шези для течения в открытых руслах.

При течении в открытых руслах разность высот полностью теряется на гидравлические сопротивления. Поэтому

$$i = f \frac{v^3}{2 gm}. \quad (66)$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2 g m i}{f}}, \quad (66a)$$

где $i = \sin \alpha$ — уклон или наклон плоскости течения к горизонту, равный разности высот потока, деленной на длину пути;

m — гидравлический радиус потока;

v — скорость потока в м/сек;

f — коэффициент сопротивления трению, являющийся функцией числа Рейнольдса.

Обозначив

$$\sqrt{2 g f} = c,$$

получим:

$$v = c \sqrt{m i}. \quad (67)$$

Эта формула была предложена Шези еще в 1775 г. на основании весьма элементарных соображений и является по настоящее время важнейшей и распространеннейшей формулой в гидравлике.

Для случая ламинарного движения в круглых трубах

$$f = \frac{16}{Re}.$$

Исследованию формулы Шези и выяснению возможности применения ее для различных частных случаев движения жидкости по наклонной плоскости посвящено большое число работ.

В соответствии с потребностями гидротехники подавляющее большинство исследований проводилось при малых уклонах и значительных глубинах потока с целью определения коэффициента c . Исследований при малой глубине потока, при больших уклонах и в области ламинарного течения очень немного. Сводка этих работ приведена в статье Купера, Дрю и Мак-Адамса⁷³.

Сопоставляя некоторые данные из работ Гопфа⁷⁴ и Шоклитча⁷⁵ над течением в открытых лотках при малой глубине потока с опытами Классена⁷⁶ и данными неопубликованной работы Чванга, Виллея и Вардена⁷⁷ над течением по вертикальным стенкам, авторы приходят к заключению, что формула Шези применима для ламинарного течения с коэффициентом c , равным $\sqrt{2 g f}$ при $f = \frac{24}{Re}$ (где Re число Рейнольдса), для всех уклонов вплоть до $i = 1$, т. е. применима к течению по вертикальной стенке.

К. тому же выводу приходит Киркбрайд⁷⁸, а также Гунтер, Фаллах и Наш⁷⁹.

Турбулентное течение при больших уклонах не исследовано. Все авторы отмечают, что критическое число Рейнольдса для течения по вертикальной стенке такое же, как и при течении в круглых трубках. Правда, Гопф из своих опытов выводит вдвое меньшее значение числа Рейнольдса.

Гунтер, Фаллах и Наш нашли, что турбулентное течение наступает при толщине слоя стекающей воды выше 0,5 мм.

Позднейшим из опубликованных исследований, посвященных изучению жидких пленок при ламинарном режиме течения, является работа Фридмана и Миллера⁸⁰. Исследование проводилось в вертикальной трубке с орошаемыми стенками. Результаты исследования в основном подтвердили и несколько расширили выводы, сделанные Купером, Дрю и Мак-Адамсом.

Все вышеуказанные работы базировались на опытах при отсутствии трения газа о свободную поверхность жидкости.

Уравнение для случая движения пленки жидкости с учетом касательного напряжения, возникающего на свободной поверхности жидкости за счет трения пара, движущегося параллельно свободной поверхности, было впервые выведено Нуссельтом⁸¹ в его классической работе о конденсации пара. Однако, Нуссельт считает, что при скоростях пара до 3 м/сек влияние трения невелико и поэтому отбрасывает в выведенном уравнении течения член, содержащий τ_0 , характеризующий касательное напряжение, приложенное на свободной поверхности слоя жидкости, тем самым превращая свое уравнение в частный вид формулы Шези для ламинарного течения при уклоне $i=1$. Этот частный вид формулы Шези оказался в соответствии с опытными данными.

Ряд работ, опубликованных в последнее время, показывает, что теория конденсации пара, данная Нуссельтом, во многих случаях расходится с опытами. Многие авторы объясняют эти расхождения турбулизацией стекающей пленки конденсата. Поэтому условия турбулизации подлежат уточнению, и несомненно, что трение на свободной поверхности не может не являться одним из существенных факторов, влияющих на кризис течения. В тесной связи с этим стоит вопрос о числовых величинах коэффициента трения между газом и жидкостью.

Шервуд и Джиллиланд⁸² в своей работе по кинетике испарения указывают, что по их измерениям коэффициент трения одинаков для жидкой и твердой поверхности. Однако, Шервуд и Джиллиланд не приводят методики измерения и вычисления; с другой стороны, измеренные ими скорости испарения оказались выше, чем это требует уравнение Кольборна, в которое входит коэффициент трения.

Вопрос о числовых коэффициентах трения газа о жидкость до последнего времени не мог еще считаться вполне выясненным.

Кроме того, имеется еще целый комплекс неизученных явлений, связанных с трением между газом и жидкостью.

Значительную ясность в этот вопрос внесла упоминавшаяся выше работа П. А. Семенова¹⁶, касающаяся изучения течения жидкости в тонких слоях. Семеновым проведено теоретическое исследование уравнения течения жидкости в плоском слое толщиной порядка нескольких десятков микрон, параллельно свободной поверхности которого движется газ с абсолютной скоростью, в несколько раз превышающей скорость жидкости. (до 30 м/сек).

Из выведено теоретическое уравнение течения с учетом силы тяготения, градиента давления, трения газа на свободной поверхности жидкого слоя и сил вязкостного сопротивления.

Экспериментальное исследование свободного течения жидкости в тонком слое было выполнено Семеновым в вертикальной стеклянной трубке с орошаемыми стенками. Непосредственное измерение толщины пленки жидкости на вертикальной стенке затруднительно: Киркбрайд, пользуясь в своих опытах также вертикальной трубкой, производил измерения (при покоящемся воздухе) с помощью микрометрического винта с острием; регистрировался момент соприкосновения острия с поверхностью пленки.

Киркбрайд указывает, что такие измерения не особенно точны, так как поверхность пленки не абсолютно гладка, а слегка волниста.

Другой метод — отсечка питания и сбор жидкости, оставшейся на стеклах — при применении вертикальных трубок с орошаемыми стенками также не дает достаточно точных результатов.

Семеновым было произведено несколько измерений по методу отсечки питания, главным образом, для качественных выводов. При обработке опытных данных толщина пленки вычислялась Семеновым по выведенному теоретическому уравнению расхода жидкости.

Экспериментальное исследование Семенова показало, что при малых скоростях воздуха, движущегося противотоком параллельно свободной поверхности жидкости, минимальная толщина жидкостной пленки составляет около 50 микрон. При меньшей толщине (меньший расход воды) пленка становится неустойчивой и разрывается под действием поверхностного натяжения, после чего течение продолжается в виде струйки с большей толщиной пленки.

При больших скоростях воздуха (свыше 10 м в секунду) Семенову удалось получать вполне устойчивую смачиваемость при значительно меньших расходах жидкости, соответствующих толщине пленки порядка 10 микрон.

Наблюдения Семенова показали следующее: в покоящемся воздухе или при малых его скоростях жидкость стекает по стенке трубки прозрачным слоем явно ламинарного характера; с увеличением расхода жидкости поверхность пленки приобретает очень легкую и нерегулярную волнистость, сохраняя при этом ламинарный характер, что подтверждалось в опытах дуском цветных струек.

При подаче воздуха со скоростью до 3—3,5 м в секунду никакого изменения в характере течения не наблюдалось. При скорости воз-

духа свыше 4 м в секунду волнистый характер поверхности пленки усиливался, однако, режим также оставался полностью ламинарным. При плавном увеличении скорости воздуха наблюдался срыв течения, сопровождавшийся толчками, подбрасыванием воды вверх и выбрасыванием в виде фонтана брызг; движение воды вниз прекращалось. При минимальном расходе воды скорость воздуха при срыве не превышала 7,3 м/сек. При больших скоростях воздуха начиналось обращенное течение; восходящее течение с всплыванием пленки жидкости вверх (газ и жидкость движутся прямоотком). Течение жидкости в таком случае при больших расходах воды и больших скоростях воздуха из неустойчивого ламинарного режима переходит в турбулентный.

Семеновым зафиксировано шесть различных режимов течения и установлены границы, в которых каждый режим может существовать.

Выполненные Семеновым определения коэффициента трения воздуха на поверхности воды показали, что:

1. Потери напора на трение в орошаемых трубках выше, чем в неорошаемых.

2. При скоростях воздуха до 5 м/сек при нисходящем течении это возрастание потерь полностью объясняется уменьшением сечения, вызванного наличием жидкой пленки. Коэффициенты трения, вычисленные с учетом толщины пленки и относительной скорости газ — жидкость, совпадают с коэффициентом трения для неорошаемой трубки в пределах $\pm 3\%$.

Таким образом, подтверждается вывод Шервуда и Джиллиланда о том, что коэффициент трения газа одинаков для жидкой и твердой поверхности. Этот чрезвычайно важный экспериментально установленный факт лишний раз подтверждает наши выводы о независимости коэффициента сопротивления насадок от материала, из которого они изготовлены, и открывает возможности для обработки и обобщения в дальнейшем экспериментальных данных по сопротивлению орошаемых скрубберных насадок.

3. При скоростях воздуха свыше 5—6 м/сек наблюдаемые потери на трение превышают теоретически ожидаемые, а коэффициенты трения оказываются выше, чем в неорошаемой трубке. Это возрастание следует отнести как за счет отклонений толщины пленки от вычисленной в большую сторону, так и, главным образом, за счет шероховатости жидкой поверхности, покрытой капиллярными волнами. Задача о коэффициентах трения при больших скоростях сводится к задаче о трении на поверхности с переменной шероховатостью, являющейся функцией скорости воздуха. Проблема шероховатости является еще очень мало изученной даже для твердых поверхностей с постоянной и точно измеримой шероховатостью и поэтому анализ опытных данных с точки зрения переменной шероховатости был бы преждевременным — требуется накопление опытных данных.

Экспериментальное определение толщины пленки жидкости при свободном течении по наклонной плоскости и обобщение результатов

В соответствии с поставленной задачей нами было выполнено экспериментальное определение толщины пленки жидкости, свободно стекающей по наклонной плоскости⁸². Для опытов была применена деревянная доска, покрытая стеклянной шлифованной пластинкой шириной 250 и длиной 750 мм и закрепленная на вертикальной стойке с помощью шарнира, для того, чтобы в процессе опытов, по желанию, можно было менять угол наклона (рис. 71).

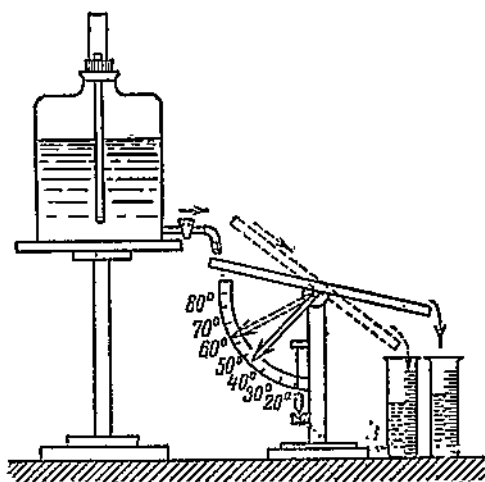


Рис. 71. Схема установки для определения толщины пленки жидкости, свободно стекающей по плоскости, в зависимости от угла наклона плоскости.

(смоченный периметр) увеличивалась. Измерение толщины пленки осуществлялось методом мгновенной отсечки питания и взвешиванием жидкости, находящейся на поверхности. Одновременно с закрытием крана на питающей линии, подставлялся к нижнему концу пластины тарированный стаканчик, в который собиралась находящаяся на поверхности жидкость. Толщина пленки вычислялась путем деления веса собранной жидкости на удельный вес и величину смоченной поверхности, измеренной с помощью планиметра. В каждом опыте замерялся также смоченный периметр, т. е. ширина пленки жидкости.

Параллельно с этим были проведены непосредственные измерения толщины пленки стекающей жидкости с помощью остроконечного щупа с микрометрическим винтом. Шаг микрометрического винта составлял 0,5 мм, шкала диска имела 100 делений. Таким образом, точность измерения была в пределах 0,05 мм.

Толщина пленки определялась по разности показаний шкалы диска при повороте винта до контакта шупа с поверхностью пленки жидкости и с твердой поверхностью. Измерение осложнялось волнообразным характером свободной поверхности пленки. Поэтому приходилось в каждом случае проделывать несколько замеров и брать среднее арифметическое значение.

Оба метода измерения толщины пленки дали совпадающие результаты.

Хотя принятые методы измерения и не отличались строгостью, однако, они давали практически достаточную степень точности для решения поставленной нами задачи.

В частности, метод мгновенной отсечки питания применительно к движению пленки жидкости по плоскости с малым наклоном обеспечивал вследствие меньшей скорости течения большую точность, чем при движении жидкости по вертикальной поверхности в трубках с орошаемыми стенками.

С помощью микрометрического винта были произведены замеры как при движении пленки жидкости по смоченной миллиметровой бумаге, так и непосредственно по полированной стеклянной поверхности. В пределах имевших место погрешностей в точности измерения существенной разницы в результатах измерения обнаружено не было.

Измерения были проведены с наклоном плоскости в 15, 30, 60 и 75°. С целью исследования влияния физических свойств жидкости (вязкость и плотность) на толщину пленки жидкости в опытах, наряду с водой, были применены растворы сахара различной концентрации и раствор хлористого кальция.

Концентрация растворов, удельный вес и вязкость указаны в нижеследующей таблице:

Растворы				Уд. вес в г/см	Вязкость в сантипуазах (при 20° С)
Вода				1	1
Раствор сахара	20%	(весов.)		1,08	1,96
»	»	40%	»	1,18	6,20
»	»	60%	»	1,282	56,50
Раствор CaCl ₂	24%	»	(291,12 г/л)	1,213	2,28

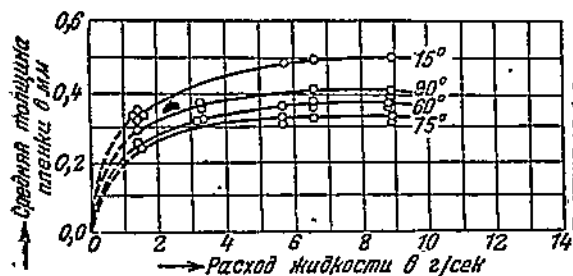


Рис. 72. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (воды) от угла наклона плоскости и расхода жидкости,

Результаты опытов с водой приведены в графической форме на рис. 72, на котором по оси абсцисс отложены значения Q расхода воды в г/сек, а по оси ординат y_0 — толщина пленки в мм.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Толщина пленки при малых расходах жидкости возрастает с увеличением расхода до определенного предела; при дальнейшем увеличении подачи жидкости толщина пленки, а стало быть, и линейная скорость жидкости увеличивается очень незначительно, асимптотически приближаясь к постоянному значению; смоченный периметр (ширина пленки) при этом увеличивается.

2. Толщина пленки зависит от угла наклона плоскости, по которой течет жидкость, и уменьшается с увеличением угла наклона за счет увеличения скорости течения.

Рис. 73. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (воды) от угла наклона плоскости.

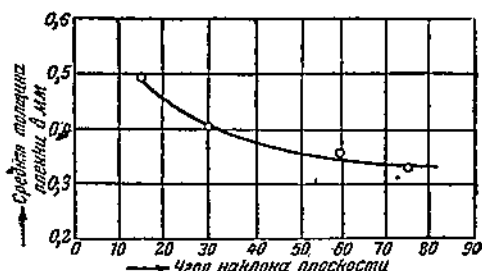


Рис. 74. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (20%-ный раствор сахара) от угла наклона плоскости и расхода жидкости.

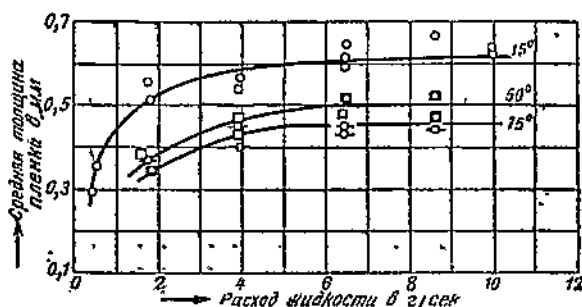
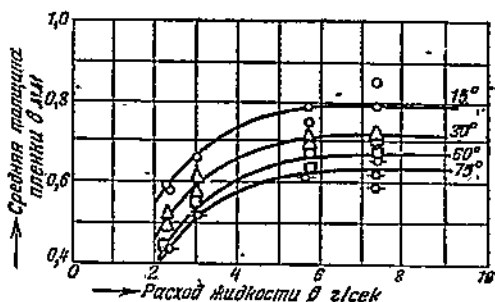


Рис. 75. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (40%-ный раствор сахара) от угла наклона плоскости и расхода жидкости.



На рис. 73 дан график зависимости толщины пленки воды от угла наклона плоскости при больших расходах воды.

Результаты наших опытов с растворами сахара и хлористого кальция даны в графической форме на рис. 74, 75, 76 и 77.

Рис. 76. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (60%-ный раствор сахара) от угла наклона плоскости и расхода жидкости.

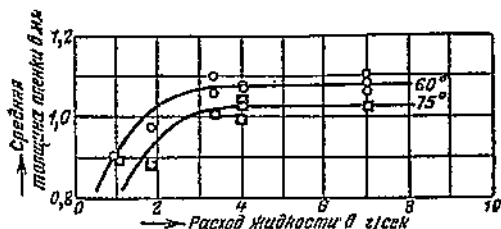
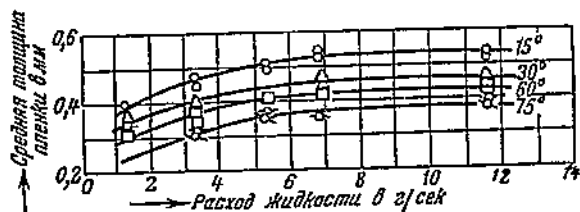


Рис. 77. График зависимости средней толщины пленки свободно текущей жидкости (раствор CaCl_2) от угла наклона плоскости и расхода жидкости.



Сравнение кривых для различных растворов при одном и том же наклоне плоскости показывает, что толщина пленки увеличивается с увеличением вязкости жидкости.

При проведении опытов нами было обнаружено, что при сохранении ламинарного режима движения свободная поверхность текущей пленки имеет волнообразный характер (ясно видны гребни волн). Такой режим можно назвать псевдоламинарным. Вибрация свободной поверхности пленки увеличивается с увеличением угла наклона, расхода жидкости и расстояния от места подвода жидкости и уменьшается с увеличением вязкости. В частности, при течении пленки 60%-ного раствора сахара вибрация поверхности почти не была заметна — характер движения был спокойный, поверхность ровная.

При движении маловязких жидкостей волнообразный характер свободной поверхности обнаруживается еще при сравнительно малых массовых скоростях порядка 1 г/сек.

Таким образом, говоря о толщине пленки жидкости, мы имеем в виду не абсолютную толщину пленки, а среднюю.

Для определения влияния касательных напряжений τ_0 , возникающих на свободной поверхности пленки при параллельном движении газа, нами были поставлены опыты с противотоком воздуха.

Для этой цели к пластине были приделаны деревянные борты, имеющие в верхней части продольные пазы. В пазы плотно вставлялась стеклянная пластина. Таким образом, получался канал четырехугольного сечения. На пластине, служащей основанием канала, помещалась смоченная миллиметровая бумага, на которую подавалась струя воды. С противоположного конца в канал с помощью воздуходувки вдувался через гибкий шланг с насадком на конце

воздух. Скорость воздуха замерялась реометром. Верхняя стеклянная пластина позволяла наблюдать за характером движения жидкой пленки в канале. Жидкость подавалась в таком количестве, чтобы ширина потока (смоченный периметр) была меньше ширины канала и бортовые ограничивающие стенки не оказывали влияния на поток жидкости.

Опыты были проведены с водой при наклоне плоскости в 60 и 75° и при линейных скоростях воздуха в 0,1, 0,35 и 0,5 м/сек.

При строго параллельном положении насадки, подводящего воздух, во время опытов не было обнаружено заметного влияния противотока на характер и размеры жидкой пленки. Отмеченные выше опыты Нуссельта и Семенова свидетельствуют о том, что при движении газа строго параллельно свободной поверхности пленки жидкости влияние его на характер движения жидкости незначительно при линейных скоростях газа до 3 м/сек. Хотя движение газа в скрубберной насадке имеет извилистый характер, однако, основываясь на вышеуказанных данных, можно считать, что при работе скрубберов в условиях, далеких от захлебывания, противоток газа не оказывает существенного влияния на среднюю толщину пленки жидкости. Это также подтверждается опытами Майо, Гунтера и Наша и опытами Ковальке, Хоугена и Ватсона, отмеченными выше.

Таким образом, основываясь на полученных нами данных средней толщины пленки жидкости, стекающей по наклонной плоскости (при покоящемся воздухе), можно с известным приближением рассчитать величину смоченной поверхности скрубберной насадки и среднее числовое значение абсолютной скорости течения жидкости в насадке.

Для обработки и обобщения полученных нами экспериментальных результатов, мы воспользовались уравнением Шеши:

$$v = c \sqrt{m i},$$

где

$$c = \sqrt{2 g / f}.$$

Для потоков с малой глубиной гидравлический радиус m равен глубине потока или толщине пленки y_0

$$m = \frac{F_a}{S} = \frac{y_0 S}{S} = y_0,$$

где F_a — поперечное сечение потока,

S — смоченный периметр,

y_0 — глубина потока или толщина пленки.

Подставив эти значения в уравнение Шеши, получим:

$$v = \sqrt{\frac{2 g y_0^3}{f}}. \quad (68)$$

Отсюда

$$f = \frac{i 2 g y_0}{v^2} = \frac{\sin \alpha 2 g y_0}{v^2}, \quad (69)$$

но

$$v = \frac{Q}{\gamma_0 \gamma S},$$

где Q — расход жидкости в г/сек.

Тогда

$$f = \frac{\sin \alpha 2g \gamma_0^3 \gamma^2 S^2}{Q^2}, \quad (69a)$$

где g — 981 см/сек²;

γ_0 — толщина пленки в см;

γ — удельный вес жидкости в г/см³;

S — смоченный периметр в см;

Q — расход жидкости в г/сек.

Коэффициент сопротивления f является функцией числа Рейнольдса *)

$$Re = \frac{4m v \gamma}{\mu} = \frac{4\gamma_0 v \gamma}{\mu} = \frac{4Q}{S\mu},$$

где μ — вязкость жидкости в пуазах (дин. сек/см² = г/сек. см).

Приводим пример вычисления значений f и Re по результатам опытов.

Дано: жидкость — вода; угол наклона плоскости — 75°; расход жидкости $Q = 6,58$ г/сек; смоченный периметр — 8 см; $\gamma = 1$ г/см³; температура 20°C.

По графику рис. 72 находим: для $Q = 6,58$ г/сек и угла наклона плоскости 75°, $\gamma_0 = 0,33$ мм = 0,033 см; $\sin 75^\circ = 0,965$.

Подставляя эти значения в уравнение (69a), получим:

$$f = \frac{0,965 \cdot 2 \cdot 981 \cdot 0,033^3 \cdot 8^2}{6,58^2} = 0,1025.$$

Найденное значение f соответствует:

$$Re = \frac{4 \cdot 6,58}{8 \cdot 0,01} = 329,$$

где 0,01 — вязкость воды при 20°C в пуазах.

Отложив вычисленные указанным способом по полученным нами экспериментальным данным числовые значения f против значений Re в логарифмических координатах, получаем график рис. 78. Прямая линия, проведенная по точкам, соответствующим экспериментальным данным, удовлетворяет уравнению:

$$f = \frac{24}{Re} = \frac{6 S \mu}{Q}. \quad (70)$$

Пунктиром на графике показана линия для случая ламинарного движения в круглых трубах:

$$f = \frac{16}{Re}.$$

*) В целях удобства обработки экспериментального материала здесь размерность отдельных членов, входящих в уравнение (69a) и в число Re , выражена в системе CGS, а не в технических единицах, как это принято нами в других разделах работы.

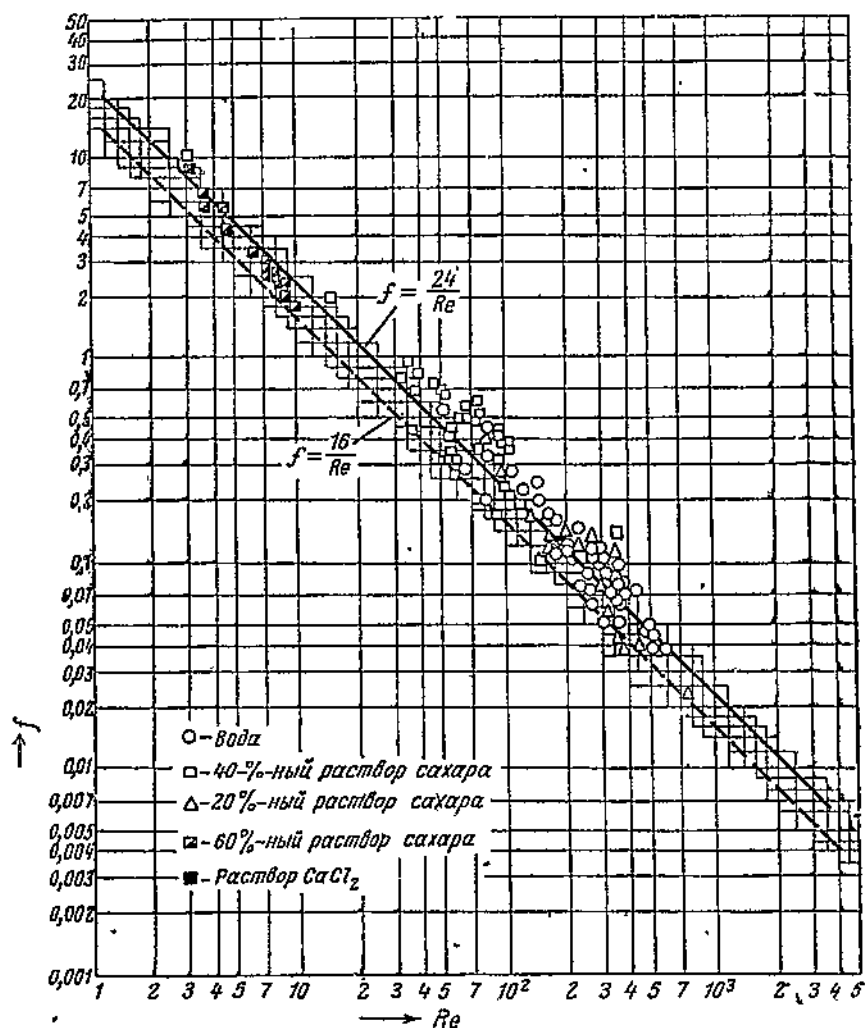


Рис. 78. Коэффициент трения f , как функция числа Рейнольдса Re .

Из уравнений (69а) и (70) получаем следующую формулу для вычисления среднего значения толщины пленки жидкости:

$$y_0 = 1,817 \sqrt[3]{\frac{Q \mu}{\sin \alpha 2g \tau^2 S}} \quad (71)$$

С помощью формулы (71) можно вычислить среднее значение толщины пленки жидкости любых удельного веса и вязкости, свободно текущей по плоскости с любым углом наклона.

Формула (71) с известным приближением может быть применена и для вычисления средней толщины пленки жидкости, стекающей по насадке в скруббере.

При загрузке скруббера кольцами Рашига засыпкой в беспорядке можно считать, что все возможные положения колец в скруббере равновероятны. Все возможные углы наклона оси колец содержатся между 0° и 90° . Тогда среднее значение угла наклона оси колец (математическое ожидание угла наклона) равно 45° .

Принимаем, что средняя толщина пленки жидкости на поверхности кольца при небольших размерах колец (до 50 мм) совпадает с толщиной пленки на плоскости, образующей с горизонтом тот же угол, что и ось кольца.

При регулярно загруженной насадке (хордовая насадка из деревянных решеток, кольца Рашига, уложенные правильными рядами, шахматная насадка и пр.) течение жидкости осуществляется по вертикальной поверхности, т. е. аналогично течению на плоскости с углом наклона 90° . Сопоставляя данные о средней толщине жидкостной пленки, вычисленные с помощью формулы (71), с результатами, полученными в опытах по определению количества жидкости, удерживаемого насадкой, можно констатировать удовлетворительное их совпадение.

Для примера вычислим по формуле (71) среднюю толщину пленки жидкости в насадке из беспорядочно загруженных керамических колец Рашига размером $50 \times 50 \times 5$ мм при интенсивности орошения $30 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$.

$$\text{Дано: } Q = \frac{30 \cdot 1000 \cdot 1000}{3600} \text{ г/сек};$$

$$\mu = 0,01 \text{ пуаза (г/сек. см).}$$

$$\sin \alpha = \sin 45^\circ = 0,7071;$$

$$g = 981 \text{ см/сек}^2;$$

$$\gamma = 1 \text{ г/см}^3;$$

$$S = 87,5 \cdot 100 \text{ см (по табл. 3).}$$

$$y_0 = 1,817 \sqrt[3]{\frac{Q \mu}{\sin \alpha 2 g \gamma^2 S}} = 1,817 \sqrt[3]{\frac{30 \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 0,01}{0,7071 \cdot 2 \cdot 981 \cdot 8750}} = 0,0346 \text{ см.}$$

Вычисленное значение совпадает со значением средней толщины пленки (количество воды, удерживаемое 1 м^2 насадки) по графику рис. 61, построенному по данным о количестве жидкости, удерживаемой насадкой скруббера. По кривой графика рис. 61 средняя толщина пленки, соответствующая интенсивности орошения $30 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$, составит $0,00035 \text{ м}$ или $0,035 \text{ см}$.

Анализируя характер кривой рис. 61, можно видеть, что зависимость средней толщины пленки от интенсивности орошения при малых значениях последней (до $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$) имеет линейный характер; затем следует изгиб кривой; наконец, при значениях интенсивности орошения в $40 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ и выше, зависимость толщины пленки снова приобретает линейный характер.

Физически характер кривой рис. 61 можно истолковать следующим образом: так как средняя толщина пленки жидкости, стекающей по поверхности насадки, имеет определенное числовое значение и не может быть меньше определенного предела, соответствующего разрыву ее под влиянием сил поверхностного натяжения, то при малой интенсивности орошения жидкости не хватает для полного покрытия всей поверхности насадки текущей пленкой и часть поверхности насадки остается не смоченной, т. е. не активной. Поэтому на первом участке кривой по мере возрастания плотности орошения постепенно увеличивается количество жидкости, удерживаемой в насадке за счет возрастания доли смоченной поверхности. Затем следует изогнутый участок кривой, который характеризует собой дальнейшее увеличение доли смоченной поверхности с одновременным увеличением толщины пленки. При достижении плотности орошения, обеспечивающей покрытие всей поверхности насадки пленкой жидкости, увеличение интенсивности орошения скруббера приводит к увеличению толщины пленки жидкости — кривая приобретает линейный характер.

Вычисление доли активной смоченной поверхности скрубберной насадки по данным средней толщины пленки жидкости при свободном течении по наклонной плоскости

Вычислив с помощью уравнения (71) среднюю толщину пленки жидкости и располагая данными о количестве жидкости, удерживаемой насадкой, можно рассчитать величину смоченной поверхности, а также определить интенсивность орошения, необходимую для полного покрытия поверхности насадки движущейся пленкой жидкости.

В качестве примера рассчитаем степень смоченности подвижной пленкой воды насадки из решеток № 1 при плотности орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$, при $t = 20^\circ\text{C}$.

$$\text{Дано: } Q = \frac{5 \cdot 1000 \cdot 1000}{3600} \text{ г/сек};$$

$$\mu = 0,01 \text{ пуаза (г/сек. см)};$$

$$\sin \alpha = 1;$$

$$g = 981 \text{ см/сек}^2;$$

$$\gamma = 1 \text{ г/см}^3;$$

$$S = 100 \cdot 100 \text{ см (по табл. 4)}.$$

$$y_0 = 1,817 \sqrt[3]{\frac{Q \mu}{\sin \alpha 2g \gamma^2 S}} = 1,817 \sqrt[3]{\frac{5000000 \cdot 0,01}{3600 \cdot 2 \cdot 981 \cdot 10000}} = 0,0162 \text{ см} = 0,162 \text{ мм}.$$

Найденное значение y_0 значительно выше той предельной толщины пленки, ниже которой последняя существовать не может и разрывается под действием сил поверхностного натяжения; как уже указывалось выше, Семеновым установлено, что предельная минимальная толщина пленки воды равна 50 микронам или 0,05 мм.

При средней толщине пленки, равной $0,0162 \text{ см}$, количество жидкости, которое должно находиться в 1 м^3 насадки, имеющей поверхность $100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при полной смоченности насадки:

$$V'_{\text{жс}} = \frac{0,0162}{100} \cdot 100 = 0,0162 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 16,2 \text{ л/м}^3.$$

Проделаем тот же расчет для насадки из беспорядочно загруженных керамических колец Рашига размером $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$.

$$\text{Дано: } Q = \frac{5 \cdot 1000 \cdot 1000}{3600} \text{ г/сек};$$

$$\mu = 0,01 \text{ пуаза};$$

$$\sin \alpha = \sin 45^\circ = 0,7071;$$

$$\gamma = 1 \text{ г/см}^3;$$

$$S = 87,5 \cdot 100 \text{ см (по табл. 3)}.$$

$$\gamma_0 = 1,817 \sqrt[3]{\frac{5000000 \cdot 0,01}{0,7071 \cdot 3600 \cdot 2 \cdot 981 \cdot 8750}} = 0,019 \text{ см}.$$

Количество жидкости, которое должно находиться в 1 м^3 насадки, имеющей поверхность $87,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при полной смоченности насадки

$$V'_{\text{жс}} = \frac{0,019}{100} \cdot 87,5 = 0,0166 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 16,6 \text{ л/м}^3.$$

По диаграмме рис. 60 находим, что количество жидкости $V'_{\text{жс}}$, удерживаемое 1 м^3 насадки из решеток № 1 при интенсивности орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$, составляет 15 л . Отсюда доля поверхности, покрытой подвижной пленкой жидкости при заданной интенсивности орошения насадки, составит:

$$\frac{V_{\text{жс}} \cdot 100}{V'_{\text{жс}}} = \frac{15 \cdot 100}{16,6} = 90\%.$$

По диаграмме рис. 59 находим количество жидкости, удерживаемое 1 м^3 насадки из керамических колец Рашига размером $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$ при интенсивности $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$; оно равно 10 л . Отсюда доля смоченной поверхности составит:

$$\frac{V_{\text{жс}} \cdot 100}{V'_{\text{жс}}} = \frac{10 \cdot 100}{16,6} = 60\%.$$

Для обеспечения полноты смоченности насадки необходимо повысить интенсивность орошения. Интенсивность орошения, соответствующая полной смоченности насадки, может быть вычислена с помощью уравнения (71) путем последовательной подстановки в него нескольких значений Q с тем, чтобы получить равенство $V'_{\text{жс}} = V_{\text{жс}}$.

Приведенный метод расчета не может претендовать на абсолютную точность, поскольку в беспорядочно загруженной насадке точно неизвестно количество застойной жидкости, образующей «мешки» в местах контакта элементов насадки. По данным Майо для $12,5\text{-мм}$ колец количество застойной жидкости приблизительно

составляет 10%. Очевидно, для более крупной насадки оно будет меньше, а для более мелкой насадки больше, чем 10%.

Однако, приведенный метод расчета дает достаточно ясную ориентировку проектировщикам, так как позволяет рассчитывать минимальную плотность орошения, необходимую для обеспечения полной смоченности насадки.

При вычислении доли смоченной поверхности для насадки из мелких колец (15 и 25 мм) можно, учитывая наличие «мешков» неподвижной жидкости в местах контакта колец и основываясь на данных Майо, рекомендовать увеличивать на 10% числовое значение средней толщины пленки, найденное по уравнению (71).

Предлагаемый нами метод вычисления средней толщины пленки и доли смоченной поверхности для регулярно загруженной насадки с вертикальной поверхностью (решетки, уложенные кольца Рашига, шахматная насадка) является достаточно надежным при условии применения оросительного устройства, обеспечивающего равномерное распределение жидкости по поперечному сечению скруббера.

Что касается насадки из колец при беспорядочной загрузке, то при проектировании необходимо для гарантии увеличивать в $1\frac{1}{2}$ —2 раза рассчитанную величину интенсивности орошения, соответствующую полной смоченности поверхности, принимая во внимание, во-первых, что смоченность внутренней поверхности колец, по данным Майо, ниже, чем наружной, и, во-вторых, разницу в толщине движущейся пленки жидкости в различных точках сечения скруббера на различной высоте вследствие тенденции орошающей жидкости стекать постепенно к стенкам скруббера.

Наши результаты расходятся с данными, полученными Майо, который, как показано было выше, нашел, что числовое значение средней толщины пленки воды, стекающей по насадке в скруббере, равно около 0,7 мм. Это расхождение можно объяснить наличием значительно больших погрешностей в методике измерения, принятой Майо, чем в наших опытах.

Майо проводил опыты в башне небольшого диаметра с неравномерным распределением насадки за счет влияния стенок башни.

Отношение $\frac{d}{D}$ в его опытах составляло 0,167, тогда как для обеспечения хорошей равномерности распределения насадки и исключения влияния стенок оно не должно превышать 0,09.

Кроме того, благодаря малым размерам башни, доля поверхности стенок башни составляла значительную величину от поверхности насадки. Полученные в опытах Майо результаты представляют собой средние суммарные значения толщины пленки на поверхности насадки и на поверхности стенок скруббера. Вследствие неравномерности распределения насадки и малого диаметра башни значительное количество орошающей жидкости в этих опытах стекало по стенкам скруббера в виде пленки большей толщины, чем средняя толщина пленки в насадке. Это и является причиной преувеличенных результатов по сравнению с результатами наших опытов.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В НАСАДКЕ ПО СЕЧЕНИЮ И ВЫСОТЕ СКРУББЕРА

Для достижения полноты смоченности насадки необходимо обеспечить равномерность орошения верхних слоев насадки с помощью соответствующего оросительного устройства. При больших плотностях орошения наилучшим типом оросительного устройства является густо перфорированная распределительная плита. В некоторых случаях оказываются удовлетворительными и другие типы оросителей.

Однако, даже при условии хорошего орошения верхних слоев насадки равномерность распределения орошающей жидкости в насадке может быть постепенно нарушена по мере движения жидкости в скруббере сверху вниз. Выше было указано, что Майо в своих опытах отметил тенденцию жидкости при движении ее в насадке стекать постепенно от центра к периферии поперечного сечения скруббера (к стенкам скруббера), что создает опасность образования в насадке не смоченных жидкостью каналов для прохода газа.

Это же было обнаружено и Киришбаумом⁶² при исследовании насадочных ректификационных колонн, который считает, что жидкость в насадке скруббера растекается конусообразно, концентрируясь постепенно у стенок скруббера. Более подробно этот вопрос освещен в цитированных выше работах Ушида и Фуджита^{47, 48} и в нашей работе, выполненной совместно с Зильбергом⁶². Однако, нельзя считать этот вопрос изученным в полной мере, и ряд выводов различных авторов не всегда согласуется между собой.

Сопоставляя наиболее достоверные данные отдельных авторов, можно считать установленным следующее:

Орошающая жидкость имеет тенденцию растекаться по насадке конусообразно, постепенно концентрируясь у стенок скруббера. Противоток газа усиливает эту тенденцию. В результате этого у стенок скруббера скопится большее количество жидкости, чем в центре поперечного сечения скруббера. Следствием этого является увеличение толщины пленки жидкости в слоях насадки, прилегающих к стенкам, и уменьшение толщины пленки в насадке, расположенной в центральной (по оси) части скруббера. При этом, вследствие недостаточного количества жидкости, пленка может стать настолько тонкой, что произойдет разрыв ее под влиянием сил поверхностного натяжения и образование отдельных струек большей толщины. В результате обнажится и останется несмоченной часть поверхности насадки, что приведет к ухудшению контакта поверхности фаз и к понижению эффективности процессов абсорбции и теплопередачи.

Важнейшей мерой для предотвращения этого является правильное соотношение между высотой слоя насадки и диаметром скруббера.

Опыты показали, что при равномерном орошении верхних слоев насадки достаточно удовлетворительное распределение орошающей

жидкости по поперечному сечению скруббера сохраняется при отношении высоты слоя насадки H к диаметру скруббера D не выше 7. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании скрубберов. В исключительных случаях можно допустить увеличение отношения $\frac{H}{D}$ до 10. Учитывая тенденцию жидкости растекаться

конусообразно, желательно при больших значениях $\frac{H}{D}$ при орошении верхних слоев насадки подавать в центр скруббера несколько больше жидкости, чем на периферийные участки.

В регулярно загруженной насадке равномерность распределения орошающей жидкости сохраняется значительно лучше, чем в беспорядочно загруженной.

В значительной степени равномерность распределения жидкости по поперечному сечению зависит от плотности орошения. С увеличением плотности орошения тенденция жидкости концентрироваться на периферии — у стенок скруббера — увеличивается. Однако, вследствие значительного избытка жидкости в насадке против количества, необходимого для обеспечения полной смоченности поверхности, опасность образования сухих каналов для газа исключается.

Ушида и Фуджита утверждают, что при одинаковых прочих условиях жидкости с большей вязкостью распределяются в насадке более равномерно. Это было доказано ими опытами с трансформаторным и турбинным маслами и водой.

Г Л А В А V

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В СКРУББЕРАХ*)

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ В БАШНЯХ И СКРУББЕРАХ

Охлаждение сухого горячего воздуха водой в скруббере связано с передачей тепла от воздуха к воде и не сопровождается изменением агрегатного состояния теплоносителя. При этом количество передаваемого тепла пропорционально поверхности контакта фаз, и средней логарифмической разности температур воздуха и воды.

Коэффициент теплопередачи, т. е. количество тепла в кал., передаваемого 1 м² поверхности контакта на 1° разности температур в час, является сложной функцией скоростей потоков, физических свойств газа и жидкости, температуры и характера насадки.

Процесс охлаждения воздуха, насыщенного парами воды, или паровоздушной смеси водой в скруббере при непосредственном соприкосновении газовой и жидкой фаз является более сложным и протекает с изменением агрегатного состояния теплоносителя, причем процесс конденсации пара происходит не на твердой стенке, а на пленке жидкости.

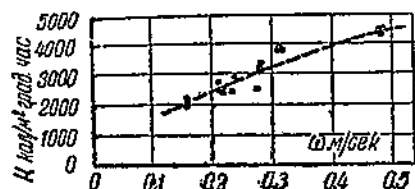
Коэффициент теплопередачи в этом случае, помимо указанных выше факторов, будет зависеть от содержания пара в паровоздушной смеси.

Изучению конденсации пара на поверхности жидкости посвящена работа Кутателадзе⁸⁴, в которой дан также обзор работ других авторов по этому вопросу, начиная с классических исследований Нуссельта. Кутателадзе проводил опыты с неподвижным паром, конденсирующимся на движущейся струе жидкости—горизонтальной и вертикальной, причем образующийся в результате охлаждения пара конденсат примешивался ко всей массе жидкости.

Кутателадзе определил зависимость коэффициента теплопередачи от скорости жидкости и получил результаты, изображенные на рис. 79.

*) Материал этой главы основан на выполненных нами совместно с И. Э. Фурмер⁸⁵ экспериментальных исследованиях процесса теплопередачи при охлаждении водой сухого горячего воздуха и смесей воздуха с водяным паром в скруббере с насадкой.

Обработывая данные опытов в критериальной форме, Кутателадзе получил следующее уравнение:



$$Ki = 0,06 Pr^{0,33} Re^{0,8}, \quad (72)$$

где Ki — критерий Кирпичева;

Pr — критерий Прандтля;

Re — критерий Рейнольдса.

Это уравнение аналогично уравнению Крауссоляда

$$Nu = 0,024 Pr^{0,37} Re^{0,8}, \quad (72a)$$

Рис. 79. График зависимости коэффициента теплопередачи при конденсации водяного пара на поверхности жидкости (воды) от скорости жидк. (по данным Кутателадзе).

На основании этого Кутателадзе пришел к чрезвычайно интересному выводу, что механизм переноса тепла от конденсирующегося пара к жидкости аналогичен переносу тепла от твердых стенок к жидкости без изменения агрегатного состояния. Следовательно, основные уравнения, известные для теплопередачи без изменения агрегатного состояния, могут быть применены для случаев теплопередачи с изменением агрегатного состояния. В данном случае необходимо только в качестве дополнительного условия учитывать то, что процесс теплопередачи в паровой фазе осуществляется путем диффузии. Это условие будет отражать критерий π , который равен $\frac{\tau}{c \Delta t}$, где

τ — скрытая теплота изменения состояния вещества;

c — теплоемкость;

Δt — температурный напор в жидкой фазе.

Величина $c \Delta t$ является теплотой перегрева или переохлаждения жидкой фазы относительно критической температуры.

Таким образом, критерий π является мерой отношения тепла, идущего на изменение агрегатного состояния, к теплоте перегрева или переохлаждения жидкой фазы относительно критической температуры.

Далее Кутателадзе исследовал механизм теплопередачи при конденсации пара, содержащего воздух. В процессе теплопередачи пар диффундирует к холодной стенке, конденсируется на ней и поэтому давление у поверхности охлаждения становится меньшим, чем в ядре потока. В разреженное пространство устремляется воздух, вследствие чего у поверхности охлаждения образуется слой воздуха, создающий дополнительное сопротивление переходу молекул пара из ядра потока к поверхности охлаждения. Вследствие этого величина коэффициента теплопередачи понижается. Процесс теплопередачи будет определяться взаимной диффузией пара и воздуха.

В этом случае в общую связь между критериями должна войти концентрация неконденсирующихся газов в ядре потока и уравнение, выражающее эту связь, будет иметь следующий вид:

$$Nu = f(Gr, Pr, \pi, \frac{\nu_{см}}{D} \cdot x), \quad (73)$$

где Nu — критерий Нуссельта;

Pr — критерий Прандтля;

π — критерий конденсации;

$\frac{\nu_{см}}{D}$ — критерий, определяющий взаимную диффузию пара и воздуха; $\nu_{см}$ — кинематическая вязкость смеси; D — коэффициент диффузии;

Gr — критерий Грасгофа;

x — концентрация не конденсирующихся газов в смеси.

Кутателадзе, исходя из уравнения (73), обработал экспериментальные данные Отмера⁸⁵, Ланга⁸⁶ и Гудымчука⁸⁷, полученные в опытах с содержащим воздух водяным паром, проведенных с горизонтальной трубкой при ламинарном течении пленки жидкости, и получил хорошее совпадение экспериментальных данных с выводами теории.

Как уже указывалось выше, опыты Кутателадзе были проведены с неподвижным паром и движущейся жидкостью в прямом канале.

В случае теплопередачи в теплообменниках скрубберного типа, и жидкая и газовая фазы находятся в движении; следовательно, во-первых, на процесс теплопередачи будет оказывать влияние трение между потоком газа и жидкости и, во-вторых, движение потока происходит в каналах сложной конфигурации переменного сечения.

Вследствие этого данные Кутателадзе не могут быть перенесены на этот случай теплообмена, а дают лишь теоретические предпосылки для обобщения экспериментальных данных, полученных при работе теплообменников скрубберного типа.

Работ, посвященных изучению теплопередачи в башнях с насадкой, очень немного. Их можно разбить на три группы:

1) Работы, посвященные изучению механизма теплопередачи в башнях, заполненных сухой насадкой, через которую пропусклся газ. В данном случае ставилась задача изучения теплопередачи для аппаратов типа доменных печей, контактных аппаратов, заполненных твердым катализатором, регенераторов тепла, сушилок и т. п.

К этим работам относятся, например, исследования Фернеса⁸⁸, Кольборна и Кинга⁸⁹, Матвеевко⁹⁰ и др.

2) Работы, в которых изучалась теплопередача в скрубберах, орошаемых жидкостью противоточно газу. К ним относятся: работа Розебаута⁹¹, который определял коэффициент теплопередачи для нефтяного газа, охлаждаемого водой в скруббере с хордовой насадкой, работа Пейсахова и Черткова⁹² по определению коэффициентов теплопередачи в скрубберах, орошаемых серной кислотой, и работа Гоголина и Рудометкина⁹³.

3) Работы по исследованию теплопередачи при охлаждении горячей воды воздухом, что имеет место в градирнях. К этой группе относятся работы Меркеля⁹⁴, Гейбеля⁹⁵, Бермана⁹⁶, Симонса⁹⁷.

Работы первой группы имеют лишь косвенное отношение к изучаемому нами вопросу, но представляют несомненный интерес в смысле теоретической разработки вопроса, поскольку они устанавливают теоретические предпосылки для объяснения механизма теплоперехода от газового потока к измельченному твердому материалу.

Это тем более важно, что, как уже указывалось по данным Кутателадзе, механизм теплопередачи при конденсации пара на жидкости аналогичен теплопередаче без изменения агрегатного состояния в трубах с твердыми стенками.

Из первой группы работ наибольший интерес представляет исследование Кольборна и Кинга⁸⁰, посвященное установлению связи между теплопередачей и потерей давления для процессов, протекающих в трубах с насадкой.

Кольборн и Кинг пропускали с помощью воздуходувки нагретый воздух через трубу, охлаждаемую снаружи водой.

Стальная труба длиной 3 фута и диаметром $2\frac{5}{8}$ дюйма была наполнена насадкой из железных спиралей. Температура воздуха измерялась термопарами, причем для расчетов бралась средняя температура по диаметру трубы; следует отметить, что разность между температурой в различных точках сечения трубы была незначительной.

Количество переданного тепла рассчитывалось по потере тепла воздухом. Поверхностью теплопередачи была поверхность трубы. Средняя логарифмическая разность бралась между температурой воздуха и температурой стенки трубы.

Помимо определения связи между потерей напора и теплопередачей в трубах с насадкой, названные авторы исследовали это же в пустой трубе.

В результате работы было обнаружено, что потеря давления в пустой трубе несколько ниже, чем потеря давления, рассчитанная по уравнению Фанинга. Авторы считают, что это разногласие может быть объяснено разницей в кинетической энергии горячего входящего газа и уже охлажденного газа, движущегося по трубе.

Кольборн и Кинг вывели на основании уравнений Рейнольдса и Фанинга зависимость между коэффициентом теплопередачи и потерей напора в пустых трубах. Они получили:

$$\frac{h}{C_p} = 341 D^{0,33} \left(\frac{\rho \Delta P}{L} \right)^{0,44}, \quad (74)$$

где h — коэффициент теплоперехода в британских тепловых единицах/ф² час °F;

D — диаметр в дюймах;

ρ — удельный вес в фунт/ф³;

ΔP — потеря давления в м/м H₂O;

L — длина трубы в футах;

C_p — удельная теплоемкость.

Что касается потери напора в трубах с насадкой, то авторы не установили математической зависимости между коэффициентом

теплоперехода и потерей давления. Они нашли, что в исследуемом случае изменение коэффициента теплоперехода при данной потере напора больше для труб с насадкой, чем для пустых труб; тем самым, вводя в трубу насадку, мы имеем возможность увеличивать количество передаваемого тепла. Далее авторы сделали вывод, что почти все виды насадок дают примерно одинаковую зависимость между коэффициентом теплоперехода и потерей давления. На основании этого Кольборн и Кинг считают, что, если не известен коэффициент теплоперехода для данной насадки, но известна потеря напора, то коэффициент теплопередачи легко можно найти по имеющимся кривым зависимости этого коэффициента от потери давления для другого типа насадки.

Из работ второй группы наиболее близкой к нашей как по характеру поставленных задач, так и по методике выполнения, является исследование Розебаута⁹¹ по определению теплопередачи в орошаемой башне.

Розебаут изучал охлаждение насыщенного водяными парами нефтяного газа водой в скруббере с хордовой насадкой. Насадка состояла из решеток, собранных из деревянных реек толщиной 12,5 мм и высотой 100 мм с расстоянием между рейками в 25 мм. Решетки загружались в скруббер крест на крест. Общая высота скруббера составляла около 5 м при диаметре 0,5 м.

Опыты проводились с нефтяным газом $\gamma_v = 0,423 \text{ кг/м}^3$. Нефтяной газ предварительно нагревался и насыщался водяными парами до относительной влажности 0,98—1,0 в скруббере, орошаемом горячей водой, и затем во втором скруббере охлаждался водой до $15,5^\circ\text{C}$ (60°F).

Розебаут разбивает процесс охлаждения насыщенного водяными парами газа на две стадии: первая — конденсация содержащихся в газовой смеси паров воды, т. е. удаление скрытой теплоты парообразования и вторая — охлаждение газа. Первая стадия имеет превалирующее значение, и коэффициент теплопередачи для нее значительно выше, чем для второй стадии. Благодаря различному паросодержанию в смеси на различных участках по высоте скруббера, коэффициент теплопередачи будет также изменяться соответственно высоте скруббера. Вследствие этого получаемые коэффициенты теплопередачи являются средними для данных условий. Для нахождения средних коэффициентов для различных участков скруббера Розебаут проводил опыты с насыщенным газом при различной начальной температуре газа, охлаждая его во всех опытах до $15,5^\circ\text{C}$. Тем самым он не только нашел значение коэффициентов теплопередачи на различных участках скруббера, но и дал проектировщикам значения коэффициентов теплопередачи для охлаждения насыщенного парами воды нефтяного газа при различных начальных температурах.

Помимо изучения влияния на коэффициент теплопередачи начальной температуры газа, Розебаут изучал также влияние на него скорости газа и плотности орошения. Скорость в опытах изме-

нялась в пределах от 0,1 до 1,8 м/сек в пересчете на газ, отнесенный к 15,5°C и 760 мм Нг, на общее сечение пустого скруббера. Результаты,

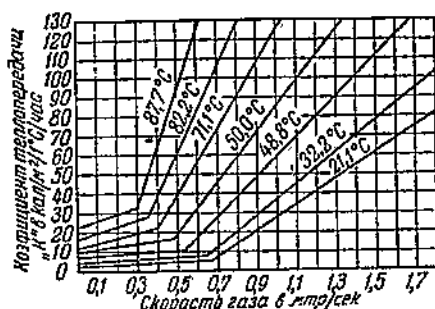


Рис. 80. График зависимости коэффициента теплопередачи при охлаждении воздуха, насыщенного водяными парами, от скорости воздуха при различных начальных температурах (по данным Розебаута).

1 линейный метр боковой поверхности насадки, после чего он несколько падает. Уменьшение коэффициента теплопередачи при плотностях орошения выше 1,2 л/мин·лин. м боковой поверхности Розебаут объясняет близостью момента захлебывания скруббера, так как, по его мнению, максимальной возможной до захлебывания плотностью орошения является орошение в 1,2 л/мин·лин. м боковой поверхности. Это объяснение максимума неверно, так как по нашим данным захлебывание скруббера, заполненного насадкой указанного типа, при максимальной скорости газа, принятой в опытах Розебаута, соответствует плотности орошения порядка 250 м³/м²·час*. Мы в наших опытах по теплопередаче в скруббере никакого максимума зависимости коэффициента теплопередачи от плотности орошения не получили.

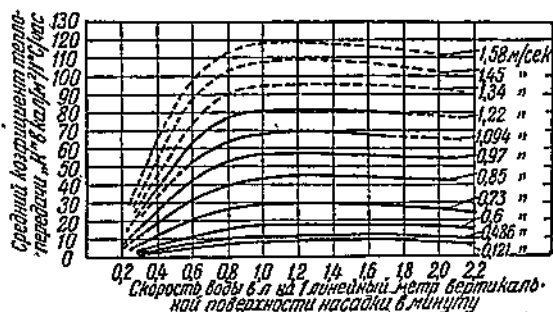


Рис. 81. График зависимости коэффициента теплопередачи при охлаждении воздуха, насыщенного водяными парами, от интенсивности орошения при различных скоростях газа и при начальной температуре газа 49°C (по данным Розебаута).

*) Розебаут выражает интенсивность орошения в литрах в минуту на 1 линейный метр боковой поверхности насадки, или, иными словами на единицу смоченного периметра. При смоченном периметре насадки в 100 м ($S=100 \text{ м}^2/\text{м}^2$) плотность орошения в 1,2 л/мин на 1 лин. м боковой поверхности будет эквивалентна $1,2 \cdot 100 \cdot 60 = 7200 \text{ л/час. м}^2 = 7,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$.

Вопрос о потере давления, несмотря на отмеченную автором необходимость его разрешения, в работе Розебаута не исследовался.

Работа Розебаута дает ценный экспериментальный материал для расчета теплообменников смешения. К сожалению, его данные относятся к небольшому диапазону плотностей орошения и только к одному типу насадки.

Розебаут приводит найденные им значения коэффициентов теплопередачи в зависимости от скорости газа и интенсивности орошения в виде графиков, не делая попытки теоретической обработки и обобщения своих экспериментальных данных.

Таганов⁹³ в 1936 г. путем обработки экспериментальных данных Розебаута вывел следующую формулу для определения средних коэффициентов теплопередачи при охлаждении нефтяного газа водой в скрубберах с хордовой насадкой:

$$K_{cp} = (62 + 0,503 P_{H_2O}) (w_0 - 0,094) - 29,2 \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}, \quad (75)$$

где P_{H_2O} — начальное парциальное давление водяных паров в газе
в мм Hg;

w_0 — скорость неконденсирующегося сухого газа, приведенного к нормальным условиям в насадке, считая на общее сечение скруббера.

Для истинных коэффициентов теплопередачи он вывел следующее уравнение, пригодное для любого газа:

$$K_p = CP_{H_2O} (1,006 w_0 - 0,0946) - B(55,1 w_0 - 34,4) \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}, \quad (75a)$$

где C и B — величины, характеризующие свойства газа.

Величины C и B для различных газов

Наименование газа	C	B
Нефтяной газ	1,00	1,00
Коксовый газ	1,00	1,00
Водяной газ	0,99	0,95
Генераторный газ	0,98	0,5
Воздух	0,93	0,3

Коэффициенты C и B найдены Тагановым расчетным путем и не были проверены экспериментально.

Пейсахов и Чертков⁹² рассчитали на основании заводских опытных данных значение коэффициента теплопередачи в башнях, орошаемых серной кислотой. Определялась зависимость коэффициента теплопередачи от скорости газа. Измерения в отдельных опытах велись в башнях различных размеров, заполненных насадкой из колец Рашига размером от 50 до 150 мм при концентрации орошающей серной кислоты от 36 до 65° Вэ и при температуре газа на входе от 55 до 399° С. Таким образом, условия проведения отдельных опытов были совершенно различными (всего в работе приводятся данные 7 опытов). На основании этих данных была получена зависимость:

$$K = 4 w \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}, \quad (76)$$

где K — коэффициент теплопередачи в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$;

w — скорость газа в м/сек в свободном сечении колец, причем оно было принято для всех размеров колец равным приблизительно 0,75 от общего сечения башни.

Кроме того, Пейсахов и Чертков провели подсчет коэффициентов теплопередачи при охлаждении серной кислотой (температура 50—55°C) дымовых газов с начальной температурой 150°—180°C. Насадка состояла из колец Рашига, уложенных рядами, с размером колец в различных рядах в 80×80 и 120×120 мм. Для этого случая, когда практически имело место только испарение содержащейся в серной кислоте воды (концентрация H_2SO_4 10—30%), была найдена следующая связь между коэффициентом теплопередачи и скоростью газа:

$$K = 6,3 w \text{ кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час.} \quad (76a)$$

Зависимость коэффициента теплопередачи от интенсивности орошения не была исследована.

Данные Пейсахова и Черткова о линейной зависимости коэффициента теплопередачи от скорости газа (уравнения 76 и 76a) вызывают большое сомнение, так как отдельные опыты проводились при различных условиях (большой диапазон в концентрациях кислоты, температуре газа, размере насадки).

В 1940 г. была опубликована работа Гоголина и Рудометкина⁹³ о теплопередаче в мокрых воздухоохладителях для кондиционирования воздуха. Они определяли значения коэффициентов теплопередачи в воздухоохладителе длиной 2 м, шириной 0,85 м и высотой 1,7 и 3,4 м. Ими исследовалась теплопередача в пустом воздухоохладителе и заполненном фарфоровыми кольцами Рашига размером 25×25 мм с высотой слоя колец 200 и 400 мм, при различных типах оросительных устройств в зависимости от скорости воздуха и плотности орошения (плотность орошения они называют «высотой дождя»).

Условия проведения испытаний: температура воды +10° С, температура воздуха на входе +28° С, плотность орошения (в случае работы с кольцами Рашига) 2—5,6 м³/м² час, весовая скорость воздуха 0,73—1,5 кг/м² сек.

Ими были получены уравнения для различной высоты насадки, устанавливающие зависимость между коэффициентом теплопередачи, скоростью воздуха и плотностью орошения:

Для высоты насадки 200 мм:

$$K = 607 H_w^{0,42} (w\gamma)^{0,625}. \quad (77)$$

Для высоты насадки 400 мм:

$$K = 935 H_w^{0,42} (w\gamma)^{0,75}, \quad (77a)$$

где K — коэффициент теплопередачи в кал °С час м² поперечного сечения воздухоохладителя;

H_w — плотность орошения в м³/м² час;

$w\gamma$ — весовая скорость воздуха в кг/м² сек.

К работам третьей группы относятся выполненное Меркелем⁹⁴

исследование теплопередачи в башенной градирне, заполненной кольцами Рашига размером 15×15 мм. Башня имела диаметр 250 мм, высота слоя насадки составляла: 0; 10,2; 20,4; 30,6; 40,8 и 51 см. Воздух подавался воздуходувкой снизу, горячая вода сверху. Температура воздуха на входе была в среднем 19°C , температура воды на входе — 30, 40, 50, 60°C . Плотность орошения составляла в среднем $3,06 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$. Расход воздуха определялся величиной отношения расхода воздуха L к расходу воды W . Отношение $\frac{L}{W} = \lambda$

было от 0,25 до 1,5. Таким образом, Меркель исследовал теплопередачу в диапазоне чрезвычайно низких скоростей воздуха. В опытах им замерялась температура воды и воздуха на различной высоте насадки в зависимости от λ и начальной температуры воды.

На основе этих данных им вычислены значения коэффициента теплопередачи на различных участках скруббера при различной величине λ и различной влажности воздуха.

Работая при постоянной плотности орошения, Меркель, следовательно, получил зависимость коэффициента теплопередачи только от скорости воздуха.

Симонс⁹⁷ на основании практических данных о работе водоохлаждающих башен, предложил следующее уравнение коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости воздуха:

$$K = 380 + 0,016 g, \quad (78)$$

где K — коэффициент теплопередачи в британских тепловых единицах в мин, фт^2 ;

g — скорость воздуха в фут/мин .

Берман⁹⁸ в своей работе учитывал влияние на процесс теплопередачи не только скорости движения воздуха, но и скорости движения воды.

На основании аналогии между теплообменом и диффузией и применяя теорию подобия, Берман устанавливает зависимость между критерием Нуссельта и числом Re для процесса теплопередачи, протекающего в градирне. Для диффузии критерий Нуссельта он видоизменил, приняв $Nu = \frac{\beta_p d}{K_p}$, где β_p — коэффициент испарения, d — линейный размер, K_p — коэффициент диффузии пара в воздух, отнесенный к градиенту парциальных давлений пара в м/час . Скорость, входящая в число Рейнольдса, была относительной скоростью движения воздуха и воды, равной разности между ними.

При работе водоохлаждителя Берман нашел две области течения воздушного потока — переходную и турбулентную, в которых зависимость критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса различна.

В общем виде зависимость может быть выражена следующим образом:

$$Nu' = C Re^m, \quad (79)$$

Для величины Re от 9400 до 27000 $m = 0,8$, для Re от 5000 до 9400 $m = 1,8$.

Значения C для различных режимов представлены в специальной таблице.

Далее Берман установил зависимость коэффициента теплопередачи α от коэффициента диффузии. Он получил, что

$$\alpha = 0,34 + 0,35 \beta_p. \quad (80)$$

Это дает возможность на основании уравнений (79) и (80) найти значение коэффициентов теплопередачи в случае охлаждения воды воздухом.

Немногочисленные данные о коэффициентах теплопередачи в воздухоохладителях в зависимости от скорости газа, найденные экспериментально Уитменом и Китсом и Робинзоном приведены в монографии Уокера, Льюиса и Мак-Адамса².

Из обзора литературы видно, что вопрос о теплопередаче в орошаемых башнях с насадкой изучен далеко недостаточно, и мы до сих пор в целом ряде практически важных случаев не располагаем надежными данными для проектирования.

Большинство работ базируется на ограниченном экспериментальном материале и посвящено определению коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости воздуха, игнорируя влияние на к. т. п. противотока движущейся воды и характера применяемой насадки.

Немногочисленные исследования процесса теплопередачи в градирнях, в которых учитывается влияние скорости жидкости, касаются процесса охлаждения воды воздухом. Выводы, сделанные на основе этих исследований, не могут быть распространены на случай охлаждения горячего газа водой вследствие известной разницы в условиях протекания процесса в градирнях и скрубберах. Закономерности, установленные в некоторых работах для процессов теплопередачи при непосредственном контакте газа и жидкости в скрубберах, ограничиваются узкими рамками условий проведения опытов. Ни в одной из упомянутых работ не дано общего метода расчета коэффициентов теплопередачи для теплообмена в скрубберах.

Решение вопроса о теплопередаче в скрубберах теоретическим путем затруднительно вследствие большой сложности процесса теплообмена в скруббере в условиях противотока газа и жидкости при непосредственном их соприкосновении на поверхности насадки.

Поэтому мы поставили перед собой задачу экспериментального исследования процесса теплопередачи в теплообменнике смешения скрубберного типа, работающем либо как холодильник газа (сухой газ), либо как холодильник-конденсатор (газ, насыщенный парами воды).

Исходя из этого, нами была спроектирована и построена модельная установка для изучения теплопередачи в теплообменнике смешения скрубберного типа.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание установки

Установка состояла из ротационной воздуходувки производительностью 300 м³/час, пластинчатого калорифера с поверхностью нагрева 8 м², парогазосмесителя, представляющего собой железный цилиндр диаметром 300 мм и высотой 520 мм и железного скруббера.

Скруббер был изготовлен из железной трубы диаметром 305 мм с толщиной стенки 5 мм. Он состоял из отдельных царг высотой около 500 мм каждая, которые соединялись между собой на фланцах с помощью болтов. Количество соединенных между собою царг варьировало в зависимости от необходимой высоты насадки в скруббере. Между первой снизу царгой и второй вставлялась колосниковая решетка, на которую нагружалась насадка. По своей конструкции скруббер, включая и водообросительную систему, был аналогичен скрубберу, применявшемуся нами для исследования гидродинамики скрубберного процесса.

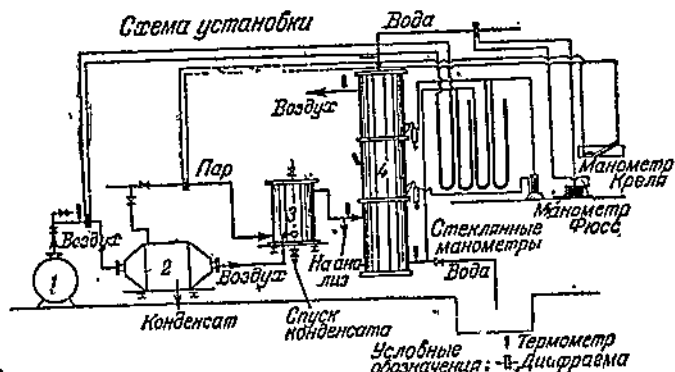


Рис. 82. Схема опытной установки по изучению теплопередачи при охлаждении воздуха и паровоздушных смесей водой.

Снаружи скруббер, смеситель, калорифер и трубопроводы были изолированы слоем асбеста толщиной 50 мм. Схема установки дана на рис. 82.

Работа установки состояла в следующем: воздух подавался воздуходувкой 1 через калорифер 2 и парогазосмеситель 3 в скруббер 4. Сверху скруббер орошался холодной водой. Охлажденный в скруббере воздух выпускался через выпускную трубу в атмосферу, а нагретая воздухом вода отводилась в канализацию.

В случае работы с паровоздушной смесью в парогазосмеситель подводился пар из паропровода. Полученная в парогазосмесителе паровоздушная смесь поступала в скруббер, где производилось охлаждение смеси и конденсация пара водой.

Пластинчатый калорифер 2 обогревался паром, а образующийся конденсат спускался в канализацию.

В опытах в качестве теплоносителя нами был принят воздух, в качестве охлаждающего агента — вода. При работе скруббера в качестве холодильника-конденсатора теплоносителем была паровоздушная смесь. Данные, полученные для этих теплоносителей и обработанные на основании теории подобия, могут быть применимы для других случаев теплообмена в теплообменниках смешения скрубберного типа.

Первым и основным фактором, определяющим процесс теплопередачи, является величина коэффициента теплопередачи, вторым для башен с насадкой — величина потери напора при прохождении газа через насадку. Оба эти фактора для данного газа и жидкости являются функцией скорости газа, плотности орошения насадки жидкостью, формы и величины насадочных тел, температуры газа и температуры жидкости. Поэтому мы определяли величину коэффициента теплопередачи и потери напора, варьируя эти факторы. Скорость газа в опытах изменялась от 0,167 до 0,65—0,70 м/сек (скорость рассчитана на полное сечение пустого скруббера для сухого газа, приведенного к нормальным условиям).

Применяемая плотность орошения была от 3,5 до 10 м³/м² час (считая на полное сечение пустого скруббера) в опытах по охлаждению сухого воздуха и от 3,5 до 25 м³/м² час в опытах по охлаждению паровоздушной смеси, причем предел плотности орошения определялся количеством отнимаемого тепла.

В качестве насадочных тел были последовательно применены: керамические кольца Рашига размером 50×50×5, 35×35×3,5 и 25×25×2,5 мм; деревянные решетки № 3 и 4 и кокс в кусках среднего размера 40,8 мм.

Характеристика этих насадок приведена в табл. 3 и 4.

Высота слоя насадки во всех опытах составляла 950—1000 мм.

Далее нами исследовалось влияние способа укладки насадки на величину коэффициента теплопередачи и потери напора. Для этой цели опыты с кольцами Рашига размером 50×50×5 мм проводились как при беспорядочной загрузке колец, так и при регулярно уложенной насадке (в шахматном порядке), а опыты с решетками при укладке их накрест и параллельно.

Температура поступающего в скруббер воздуха была 75—80°C, а поступающей, паровоздушной смеси — 80—90°C. Температура орошающей скруббер воды колебалась от 2 до 20°C в зависимости от времени года. Исследовать изменение коэффициента теплопередачи от изменения начальной температуры воздуха или смеси или — что то же — в зависимости от средней разности температур между водой и теплоносителем нам не удалось, так как интервал температур, в котором мы имели возможность работать, был невелик. Однако, выведенные на основании экспериментальных данных формулы коэффициентов теплопередачи в критериальной форме учитывают влияние на коэффициент теплопередачи физических свойств

газа, изменяющихся с температурой. Вычисление коэффициентов теплопередачи производилось по формуле:

$$K = \frac{q}{S \Delta t} ;$$

где

K — коэффициент теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час}$;

q — количество переданного от воздуха воде тепла в кал ;

S — поверхность теплопередачи в м^2 ;

Δt — средняя логарифмическая разность температур.

Поверхность теплопередачи в расчетах принималась равной общей геометрической поверхности загруженной насадки плюс поверхность стенок скруббера. Поверхность насадки определялась путем подсчета количества элементов насадки при загрузке и умножения его на среднюю поверхность отдельных элементов.

Средняя логарифмическая разность температур между водой и воздухом подсчитывалась по уравнению.

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{2,3 \log \frac{t_1}{t_2}}$$

$$t_2 \left\{ \begin{array}{c} t_1^{\text{H}_2\text{O}} \xrightarrow{\text{вода}} t_2^{\text{H}_2\text{O}} \\ t_2^{\text{a}} \xleftarrow{\text{воздух}} t_1^{\text{a}} \end{array} \right\} t_1 ,$$

где: t_1^{a} — начальная температура воздуха в $^\circ\text{C}$;

t_2^{a} — конечная температура воздуха в $^\circ\text{C}$;

$t_1^{\text{H}_2\text{O}}$ — начальная температура воды в $^\circ\text{C}$;

$t_2^{\text{H}_2\text{O}}$ — конечная температура воды в $^\circ\text{C}$;

$$t_1 = t_1^{\text{a}} - t_2^{\text{H}_2\text{O}} ;$$

$$t_2 = t_2^{\text{a}} - t_1^{\text{H}_2\text{O}} .$$

Для определения средней логарифмической разности температур производилось измерение температуры на входе и на выходе воды и воздуха. Измерение температуры производилось ртутными прецизионными термометрами с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$.

Термометры предварительно проверялись по температуре кипения воды; расхождение между показаниями всех установленных термометров составляло $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Количество переданного воздухом или паровоздушной смесью тепла подсчитывалось по изменению температуры орошающей воды.

Предварительно перед началом всей работы были проведены «холостые» опыты при орошении скруббера водой без подачи воздуха. При этом температура воды на входе и выходе из скруббера оказалась одна и та же. Следовательно, определение количества переданного тепла по воде исключало необходимость учета потерь тепла в окружающую среду.

Подсчет количества переданного тепла производился по уравнению

$$q = Q (t_2^{\text{H}_2\text{O}} - t_1^{\text{H}_2\text{O}}) \cdot 1000 \text{ кал},$$

где Q — расход воды в $\text{м}^3/\text{час}$.

Расход воды и воздуха измерялся с помощью откалиброванных дифференциальных манометров, присоединенных к соответствующим нормальным диафрагмам на водяной и воздушной магистралях.

Для случаев определения коэффициента теплопередачи от паровоздушной смеси к воде при различных паросодержаниях необходима была проверка содержания пара в смеси.

Для этой цели на паропроводе, подводящем пар к парогазосмесителю, была установлена диафрагма $\varnothing 25 \text{ мм}$, присоединенная к наклонному манометру Креля. Между трубопроводом и манометром устанавливались конденсаторы. В тягомер заливалась ртуть.

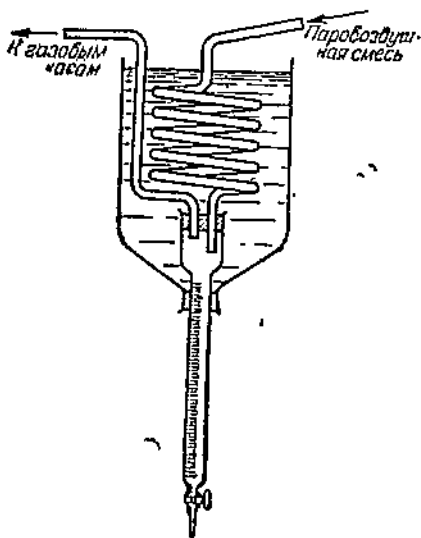


Рис. 83. Схема конденсатора для определения паросодержания в паровоздушных смесях.

Калибровка манометра Креля производилась следующим образом. Смесь воздуха с паром с помощью воздуходувки протягивалась через охлаждаемый стеклянный змеевик, соединенный с бюреткой (рис. 83). Образовавшийся в змеевике конденсат стекал в бюретку и по его количеству определялось количество влаги в смеси. Для измерения количества оставшегося после конденсации водяных паров воздуха он пропускаться из бюретки через газовые часы. По количеству конденсата и количеству сухого

воздуха (по показаниям газовых часов) рассчитывалось влагосодержание в смеси на входе в скруббер. При расчете принималась во внимание также влага, уходящая с воздухом из конденсатора, причем считалось, что влагосодержание равно 100% при температуре воздуха на выходе из охлаждающего змеевика.

На основании таких анализов была составлена калибровочная кривая, указывающая расход пара, соответствующий различным показаниям тягомера Креля. Вследствие того, что изменение содержания пара в смеси сильно сказывается на величине коэффициента теплопередачи, данные, полученные на калибровочной кривой, служили только для ориентировки при составлении смеси нужного состава. При проведении каждого опыта производился анализ паровоздушной смеси и на основании его корректировалась подача пара до установления необходимого паросодержания.

Потеря напора газа определялась путем измерения разности давления между двумя точками по высоте насадки (в нижней и верхней части скруббера) с помощью миниметра типа Аскания, как это было описано выше. Расстояние между точками присоединения миниметра было 720 мм. Зафиксированная миниметром потеря напора пересчитывалась на один метр высоты насадки.

Время установления теплового равновесия

При охлаждении воздуха или паровоздушной смеси водой в теплообменнике скрубберного типа тепло воздуха расходуется на подогрев орошающей воды, нагрев насадки и потери тепла в окружающую среду.

При проведении первых ориентировочных опытов мы столкнулись с фактом, что насадка способна аккумулировать в себе определенное количество тепла. Это сказалось в том, что при изменении режима работы установки, например; при увеличении плотности орошения насадки или же при уменьшении расхода воздуха, количество получаемого водой тепла было больше, чем количество тепла, теряемого воздухом, т. е. имело место несовпадение теплового баланса. В разное время от начала работы установки в новых условиях количество получаемого водой тепла было различно.

Это происходило вследствие частичного нагрева воды насадкой. Отдача тепла насадкой происходила до момента наступления равновесия, когда тепло воздуха расходуется в постоянных соотношениях на отдачу в окружающую среду и нагрев воды.

После наступления равновесия количество тепла, приобретаемого водой при данных условиях работы скруббера, должно быть постоянным. Мы провели опыты по установлению времени, необходимого для наступления равновесия. Оказалось, что равновесие наступает через 10—15 минут после начала работы установки в определенных условиях. После этого количество тепла, получаемого водой, было постоянным.

Поэтому во всех дальнейших опытах для того, чтобы убедиться в устойчивости теплового режима, мы производили измерения два раза: первое — через 10 минут и второе — через 15 минут после начала опыта. В случае несовпадения результатов замеров измерение производилось снова, пока не получались совпадающие результаты.

3. ОПЫТЫ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ ВОЗДУХА ВОДОЙ В СКРУББЕРЕ С НАСАДКОЙ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты опытов

Результаты опытов сведены в табл. 9, в которой указаны числовые значения коэффициентов теплопередачи для различных насадок в зависимости от скорости воздуха и плотности орошения. По данным этой таблицы построены графики рис. 84 и 85.

Табл. 9 показывает, что для колец Рашига значение коэффициентов теплопередачи на единицу поверхности практически не зависит от диаметра колец и для различных размеров колец мы имеем одинаковое значение коэффициентов теплопередачи.

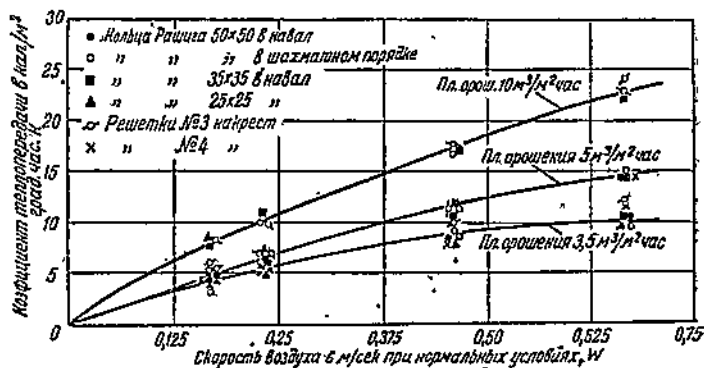


Рис. 84. График зависимости коэффициента теплопередачи от скорости воздуха для различных насадок. Охлаждение воздуха водой.

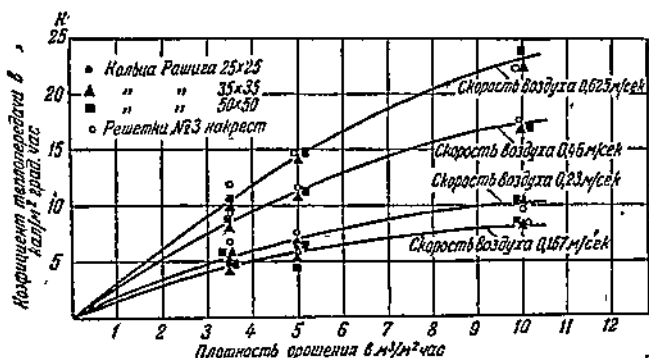


Рис. 85. График зависимости коэффициента теплопередачи от плотности орошения для различных насадок. Охлаждение воздуха водой.

Насадка из деревянных решеток показала приблизительно то же значение коэффициентов теплопередачи, что и кольца Рашига. Что касается насадки из кокса, то она показала более высокие значения коэффициентов теплопередачи.

В опытах по исследованию влияния способа укладки насадки на величину коэффициентов теплопередачи было установлено, что для колец Рашига при регулярной укладке при малых плотностях орошения получаются коэффициенты теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{час}$ те же, что и при беспорядочной загрузке. При параллельной загрузке деревянных решеток № 3 мы получили для плотности орошения 3,5 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$ такие же коэффициенты теплопередачи как при загрузке решеток накрест.

Таблица 9

Значение коэффициентов теплопередачи в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$ для различных насадок
Охлаждение воздуха водой

Скорость воздуха в м/сек при нормальных условиях #)	Плотность орошения в м ³ /м ² час	Значение коэффициентов теплопередачи в кал/м ² °С час							
		Керамические кольца Рашига				Решетки			Кокс 40,8 мм
		50×50, беспорядочно загруженные	50×50, регулярно загруженные	35×35, беспорядочно загруженные	25×25, беспорядочно загруженные	№ 3 накрест	№ 3 параллельно	№ 4 накрест	
0,66	3,5	10,4	9,5	9,55	9,45	12,0	11,7	—	—
0,46	3,5	8,45	9,1	8,35	8,05	9,85	8,2	—	—
0,23	3,5	5,28	6,06	5,65	5,1	7,04	5,5	—	—
0,167	3,5	4,8	3,53	4,4	3,7	6,15	—	—	—
0,66	5	14,15	10,3	13,4	11,2	14,6	10,2	14,5	20,0
0,46	5	11,4	7,95	10,8	9,3	11,5	8,65	11,85	15,7
0,23	5	6,35	4,9	5,8	7,3	6,94	6,15	—	9,8
0,167	5	4,53	5,2	4,53	4,4	5,7	—	7,5	7,8
0,66	10	24,1	—	22,1	—	22,7	13,7	—	—
0,46	10	17,05	—	17,1	—	17,6	9,2	—	—
0,23	10	10,2	—	10,8	—	9,9	6,0	—	—
0,167	10	8,2	—	8,0	—	8,3	4,9	—	—

При увеличении плотности орошения для регулярно загруженной насадки получают меньшие коэффициенты теплопередачи, чем для беспорядочно загруженной, причем, чем больше величина орошения, тем большей становится разница между коэффициентами, при прочих равных условиях.

В то время как числовое значение коэффициента теплопередачи для нерегулярной загрузки колец Рашига является функцией плотности орошения, для колец, загруженных укладкой, коэффициент теплопередачи практически не зависит от плотности орошения.

Из приведенных таблиц видно, что насадка, увеличивая поверхность контакта фаз, улучшает процесс теплопередачи. Это делается более наглядным, если сравнить значения объемных коэффициентов теплопередачи ($\text{кал/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C час}$) для различных насадок с объемными коэффициентами теплопередачи, полученными в опытах при охлаждении воздуха водой в пустом скруббере.

Объемные коэффициенты теплопередачи для различных насадок подсчитывались умножением значения коэффициентов теплопередачи для единицы поверхности насадки ($\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$) на поверхность одного кубического метра насадки. Полученные данные сведены в табл. 10. Из этой табл. 10 следует, что для колец Рашига величина объемного коэффициента теплопередачи обратно пропорциональна диаметру колец.

*) Скорость воздуха принята, считая на общее сечение пустого (незаполненного насадкой) скруббера.

Значения потерь напора газа для различных насадок, полученные нами в условиях проведения опытов, сведены в табл. 11.

Обработка и обобщение результатов опытов

Мы получили для большинства насадок равенство коэффициентов теплопередачи на единицу поверхности. Исключение составляет кокс, показавший более высокие значения коэффициента теплопередачи.

Перенос тепла от протекающего через насадку воздуха к воде происходит за счет конвекции. В случае охлаждения воздуха, насыщенного водяными парами, теплообмен сопровождается изменением агрегатного состояния. Охлаждаемый воздух движется в насадке по смоченным жидкостью каналам, образуемым элементами насадки.

Перенос тепла от воздуха к жидкости осуществляется перемещением частиц воздуха из турбулентно-текущего ядра воздуха через ламинарно-текущий пограничный слой воздуха к пленке воды на насадке. Теплопереход будет тем интенсивнее, чем больше турбулизирован поток воздуха. Степень турбулизации потока характеризуется распределением скоростей движения частиц внутри потока, которое зависит от скорости движения воздуха.

Как показали опыты, при охлаждении воздуха водой в теплообменнике смешения скрубберного типа воздух на выходе имеет влажность, соответствующую 100% насыщению для данной температуры. Если абсолютная влажность воздуха на входе была больше, чем это соответствует температуре воздуха на выходе из скруббера, то в скруббере происходит частичная конденсация водяных паров, содержащихся в воздухе. Если же температура воздуха на выходе высока, то, наоборот, происходит донасыщение воздуха водой до влажности, соответствующей температуре выхода (в том случае, когда абсолютная влажность воздуха на входе меньше, чем это соответствует температуре воздуха на выходе).

Мы стремились проводить наши опыты при постоянной абсолютной влажности воздуха на входе и выходе из скруббера с тем, чтобы исключить влияние процессов испарения воды или конденсации пара на процесс теплопередачи.

С целью обобщения полученных экспериментальных результатов и применения их для расчета промышленных скрубберов при условиях, выходящих за пределы, имевших место в наших опытах, мы воспользовались теорией подобия.

На основании второй теоремы теории подобия распространение опытных данных на подобные явления возможно при обработке их в критериальной форме. Для этой цели нужно результаты эксперимента представить в виде функциональной зависимости между критериями.

Для процесса теплообмена без изменения агрегатного состояния эта функциональная зависимость выразится следующим образом:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr), \quad (81)$$

Таблица 10

Значения объемных коэффициентов теплопередачи для различных насадок
Охлаждение воздуха водой

Скорость воздуха в м/сек	Плотность орошения в м ³ /м ² час	Значения коэффициентов теплопередачи в кал/м ³ °С час							
		Пустой скруббер	Керамические кольца Рашига				Решетки		
			50 × 50, за- грузка в бес- порядке	50 × 50, за- грузка в шах- матн. порядке	35 × 35, за- грузка в бес- порядке	25 × 25, за- грузка в бес- порядке	№ 3 накрест	№ 3 парал- лельно	№ 4 накрест
0,66	3,5	172	935	1085	1400	1890	780	780	—
0,46	3,5	176	760	1040	1060	1600	640	640	—
0,23	3,5	184	475	414	815	1000	458	430	—
0,167	3,5	432	482	404	635	720	400	—	—
0,66	5	266	1330	1180	1890	2240	950	795	704
0,46	5	207	1025	910	1485	1860	747	675	575
0,23	5	163	561	560	812	1260	448	480	495
0,167	5	—	407	595	625	860	370	—	366
0,66	10	448	2170	—	3450	—	1475	1070	1375
0,46	10	394	1535	—	2670	—	1142	813	1115
0,23	10	356	917	—	1690	—	643	580	747
0,167	10	—	735	—	1250	—	539	—	610
									40,8 мм

Таблица 11

Потери напора 1 м высоты слоя насадки в мм водяного столба для раз-
личных насадок

Охлаждение воздуха водой

Скорость воздуха в м/сек	Плотность орошения в м ³ /м ² час	Потери напора 1 м высоты слоя насадки в мм водян. столба							
		Керамические кольца Рашига				Решетки			Кокс
		50 × 50, за- грузка в бес- порядке	50 × 50, за- грузка в шах- матн. порядке	35 × 35, за- грузка в бес- порядке	25 × 25, за- грузка в бес- порядке	№ 3 накрест	№ 3 парал- лельно	№ 4 накрест	
0,66	3,5	9,75	1,78	—	17,56	1,4	0,47	—	—
0,46	3,5	4,23	1,07	—	9,17	0,985	0,292	—	—
0,23	3,5	1,89	0,46	2,82	2,45	0,64	0,15	—	—
0,167	3,5	1,17	0,24	1,95	—	0,515	—	—	—
0,66	5	8,9	1,86	16,6	25,9	1,07	—	0,64	16,5
0,46	5	4,44	1,07	7,8	14,1	0,68	—	0,43	8,14
0,23	5	1,39	0,43	2,96	4,65	0,292	—	0,208	2,22
0,167	5	1,17	0,28	2,02	—	0,18	—	0,12	1,14
0,66	10	9,34	2,35	17,35	28,2	1,01	0,79	0,64	—
0,46	10	4,51	1,21	9,4	15,2	0,735	0,515	0,45	—
0,23	10	1,23	0,5	2,98	5,18	0,306	0,25	0,28	—
0,167	10	1,18	—	2,24	—	0,25	—	0,25	—

где $Nu = \frac{\alpha a}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

α — коэффициент теплоперевода (частный коэффициент теплопередачи);

d — диаметр трубы;

λ — теплопроводность;

$Re = \frac{wd}{\nu}$ — критерий Рейнольдса;

w — скорость газа;

ν — коэффициент кинематической вязкости;

$Gr = \frac{g l^3 \rho}{\nu^2}$ — критерий Грасгофа;

g — ускорение силы тяжести;

l — основной линейный размер системы (например, диаметр трубы);

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — критерий Прандтля;

a — коэффициент температуропроводности;

c — теплоемкость;

γ — удельный вес.

При вынужденном движении, с которым мы имели дело, величиной Gr , учитывающей влияние силы тяжести, можно пренебречь.

Определяемый критерий Нуссельта в нашем случае будет несколько отличным от обычно употребляемого критерия Nu . Величину частного коэффициента теплопередачи α , входящую в критерий, мы заменили величиной общего коэффициента теплопередачи K в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$, учитывающий термическое сопротивление пленок воды и воздуха. Этот коэффициент был получен нами экспериментально.

Такой видоизмененный критерий Нуссельта иногда называют критерием Кирпичева и обозначают через $Ki = \frac{Kd}{\lambda}$. В том интервале температур, в котором мы работали, величина критерия Прандтля для воздуха остается неизменной и равной 0,722. Поэтому в этом интервале зависимость между критериями может быть выражена следующим образом:

$$Ki = f(Re). \quad (82)$$

Однако для случаев теплообмена при более высоких температурах и для других газов, когда величина Pr может иметь другое значение, зависимость между критериями будет:

$$Ki = f(Re, Pr). \quad (83)$$

Представляя зависимость между критериями в виде степенной функции, получим:

$$Ki = a Re^m Pr^n. \quad (84)$$

При охлаждении воздуха в трубе, Крауссольтсом найдено числовое значение показателя степени критерия Прандтля $n = 0,37$; Шервуд и Лауренс получили наилучшие данные при обработке опытов по охлаждению газов и жидкостей в трубе при $n = 0,33$.

Для случая конденсации пара на поверхности воды Кутателадзе

получил показатель степени числа Прандтля— $1/3$, т. е. тот же, что и полученный Шервудом и Лауренсом для труб.

На основании этого и принимая, что в нашем случае газ движется в канале переменного сечения со стенками, покрытыми жидкой пленкой, мы можем принять условно показатель степени числа Прандтля равным 0,33. Тогда уравнение (84) примет вид:

$$Ki = a Re^m Pr^{0,33} \quad (85)$$

или

$$\frac{Ki}{Pr^{0,33}} = a Re^m. \quad (86)$$

При обработке результатов опытов величина критерия Кирпичева $Ki = \frac{Kd}{\lambda}$ подсчитывалась следующим образом: K — коэффициент теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$ брался из опытных данных. Вместо диаметра трубы d подставлялось значение «эквивалентного диаметра» насадки $d_a = 4m$, где $m = \frac{V_{cs}}{S}$ — гидравлический радиус. Числовые значения гидравлического радиуса для различных насадок были взяты из табл. 3 и 4, причем в них вносились поправки, связанные с изменением свободного объема в зависимости от интенсивности орошения, согласно графикам рис. 62 и 64.

Критерий Рейнольдса для различных насадок принимается согласно предыдущему в следующей форме:

$$Re = \frac{d_a \bar{w}_0}{F_a \nu} = \frac{4m \bar{w}_0}{V_{cs} \nu} = \frac{4 \bar{w}_0}{S \nu}.$$

В этом выражении скорость воздуха $\bar{w}_0$ приводилась к средней арифметической температуре в каждом опыте.

Числовые значения коэффициента теплопроводности λ для сухого воздуха, входящего в критерий Ki , и коэффициента кинематической вязкости ν , входящего в критерий Re , а также значения критерия Pr (Прандтля) при расчетах брались из табл. 16 (см. приложение).

Все величины, характеризующие физические свойства газа — вязкость, теплопроводность, теплоемкость, плотность — были взяты при средней арифметической температуре воздуха.

Такой метод усреднения определяющей температуры был выбран нами как достаточно хорошо учитывающий влияние температуры на свойства воздуха и как наиболее простой для проведения расчетов.

На рис. 86 представлены результаты наших исследований в координатах $Re - \frac{Ki}{Pr^{0,33}}$.

Полученные нами из эксперимента точки в логарифмической анорморфозе хорошо улеглись на прямые линии, причем каждая из прямых соответствует определенной плотности орошения.

Для кокса были получены более высокие значения коэффициента теплопередачи, но значения чисел Ki для него оказались те же, что

$\frac{Ki}{Pr^{0,33}}$

и для других насадок при тех же значениях Re . Полученные для кокса значения критериев Кирпичева удовлетворительно укладываются на прямые $\frac{Ki}{Pr^{0,33}} =$

$= f(Re)$, построенные для других типов насадок.

Более высокое значение коэффициентов теплопередачи для кокса при одинаковых скоростях воздуха по сравнению с другими насадками (см. табл. 9) объясняется тем, что при этих скоростях воздуха фактическая

Рис. 86. График $Ki = f(Re, Pr)$ при охлаждении воздуха водой в скруббере с насадкой.

скорость движения через кокс больше, чем скорость движения воздуха через другие насадки. Поэтому при одних и тех же скоростях воздуха (считая на общее сечение пустого скруббера) коэффициенты теплопередачи у кокса выше, чем у других насадок. Равным же числам Рейнольдса соответствуют равные значения критерия Кирпичева для всех типов насадок.

Математическая зависимость между Ki и Re для различных плотностей орошения на основании построенных графиков получилась следующая:

Для плотности орошения $3,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$:

$$Ki = 0,09 Re^{0,76} Pr^{0,33} \quad (87)$$

Для плотности орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$:

$$Ki = 0,15 Re^{0,76} Pr^{0,33} \quad (88)$$

Для плотности орошения $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$:

$$Ki = 0,225 Re^{0,76} Pr^{0,33} \quad (89)$$

Из этих уравнений видно, что показатель степени числа Рейнольдса получился приблизительно тот же, что получен рядом авторов для труб. Отсюда следует, что предпосылка при выводе уравнений о том, что движение через насадку аналогично движению по трубам, правильна. Однако, надо иметь в виду, что жидкая пленка, покрывающая поверхность насадки, не является неподвижной и теплообмен внутри нее осуществляется путем конвекции. При этом, ко-

нечно, имеет значение скорость протекания жидкости. Благодаря этому мы получили ряд уравнений, соответствующих различным плотностям орошений. В этих уравнениях показатели степени чисел Re и Pr одинаковы, но значения коэффициентов a получились разные, причем их величина возрастает по мере увеличения плотности орошения. Следовательно, их величина характеризует собой процесс теплопередачи внутри жидкости, стекающей по насадке, и зависит от плотности орошения или же от числа Re жидкости.

Число Рейнольдса для жидкости мы условно приняли в следующем выражении:

$$Re_{\text{жс}} = \frac{Q d_2}{3600 \nu},$$

где Q — интенсивность орошения в $\text{м}^3/\text{м}^2$ час;

d_2 — эквивалентный диаметр в м;

ν — коэффициент кинематической вязкости воды в $\text{м}^2/\text{сек}$ при средней температуре воды (числовое значение при расчетах бралось из табл. 17, см. приложение).

Отложив в логарифмических координатах числовые значения коэффициента a против соответствующих значений $Re_{\text{жс}}$ (рис. 87), получаем следующую функциональную зависимость между ними:

$$a = 0,01 Re_{\text{жс}}^{0,82}. \quad (90)$$

Приняв это выражение, получаем окончательное уравнение, характеризующее процесс теплопередачи в скруббере:

$$Ki = 0,01 Re_a^{0,76} Re_{\text{жс}}^{0,82} Pr^{0,33}.$$

Для проверки мы построили график зависимости $\frac{Ki}{Pr^{0,33}}$

от $Re_a \cdot Re_{\text{жс}}$ (рис. 88). Все экспериментально полученные точки достаточно хорошо уложились на одной прямой, удовлетворяющей следующему уравнению:

$$Ki = \frac{K d_2}{\lambda} = 0,01 Re_a^{0,7} \cdot Re_{\text{жс}}^{0,7} Pr^{0,33}. \quad (92)$$

Уравнение (92) принято нами в качестве окончательного для характеристики процесса теплопередачи в скрубберах.

Подсчитанные по этому уравнению значения критерия Кирпичева хорошо согласуются с экспериментальными данными. В среднем расхождение между расчетными и опытными данными составляет 10—15%, что лежит в пределах точности наших опытов.

Уравнение (92) дает возможность подсчитать коэффициент теплопередачи от горячего газа к жидкости в теплообменниках смешения скрубберного типа и обобщает полученные нами экспери-

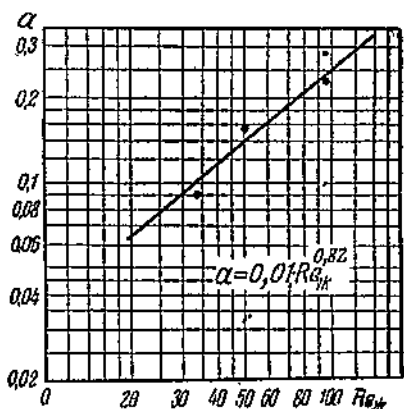


Рис. 87. График зависимости коэффициента a в уравнении (86) от числа Рейнольдса орошающей жидкости.

ментальные данные. Для целей проектирования уравнение (92) является универсальным.

Если в проектируемом аппарате условия протекания процесса примерно соответствуют условиям протекания процесса в наших опытах, то для этого случая можно установить зависимость между коэффициентом теплопередачи K , скоростью воздуха $\bar{w}_0$ и плотностью орошения Q , т. е. найти:

$$K = f(\bar{w}_0, Q).$$

Основываясь на полученных экспериментальных данных, мы нашли следующее уравнение, дающее зависимость K от скорости воздуха и плотности орошения:

$$K = 7,1 \bar{w}_0^{0,7} \cdot Q^{0,7}, \quad (93)$$

где $\bar{w}_0$ — скорость воздуха в м/сек при нормальных условиях по сечению пустого скруббера;

Q — плотность орошения в м³/м² час по сечению пустого скруббера.

Результаты, полученные по этому уравнению, так же достаточно удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Оценка эффективности различных насадок для процесса теплопередачи

Вопрос выбора способа загрузки насадки является весьма актуальным потому, что хотя при регулярной загрузке насадки при некоторых условиях коэффициент теплопередачи несколько ниже, но и потери напора в несколько раз меньше, чем при нерегулярной.

Из табл. 10 видно, что различные насадки обладают различными объемными коэффициентами теплопередачи, причем последние во всех случаях больше, чем при теплообмене между жидкостью и газом в пустом скруббере. Следовательно, введение насадки улучшает условия теплопередачи, причем объемный коэффициент теплопередачи тем больше, чем больше поверхность насадки в единице объема.

Кроме того, насадка турбулизует поток и тем самым улучшает условия теплообмена. О степени турбулизации потока можно в известной мере судить по данным о потере напора. Сравнивая результаты, полученные в опытах с насадками, имеющими приблизительно одинаковую поверхность в единице объема, можно видеть,



Рис. 88. График $Ki = f(Re_0, Re_{ж}, P_r)$ при охлаждении воздуха водой в скруббере с насадкой. Насадки: кольца Рашига размером 50×50 мм, 35×35 мм и 25×25 мм, кокс размером $40,8$ мм и деревянные решетки № 3, уложенные накрест и параллельно.

что насадки, показывающие большую потерю напора, дают большие значения объемных коэффициентов теплопередачи.

Однако, если при осуществлении процесса в пустой трубе коэффициент теплопередачи пропорционален гидравлическому сопротивлению, то при осуществлении процесса в насадке скруббера этой пропорциональности нет.

Анализируя данные табл. 10 и 11, мы видим, что насадки, показывающие большее гидравлическое сопротивление, показывают и больший объемный коэффициент теплопередачи. Но возрастание гидравлического сопротивления значительно больше, чем возрастание объемного коэффициента сопротивления. Опыты с насадкой из деревянных решеток № 3 при загрузке их накрест и параллельно показывают, что числовые значения коэффициента теплопередачи получаются почти одинаковыми, тогда как потери напора при загрузке накрест в 3—4 раза выше, чем при загрузке параллельно. Это достаточно убедительно свидетельствует о том, что коэффициент теплопередачи пропорционален лишь главным образом фрикционной части гидравлического сопротивления.

Потери напора, обусловленные сопротивлением трения, в обоих случаях будут одинаковы, поскольку одинакова поверхность трения. Большая величина потери напора при загрузке накрест вызывается тем, что, наряду с фрикционным сопротивлением, здесь значительную роль играют местные сопротивления, обусловленные сжатием и расширением газовой струи. Возрастание местных сопротивлений не приводит к значительному увеличению коэффициента теплопередачи, но в то же время связано с увеличением расхода энергии. Это является доказательством того, что наилучшей насадкой является насадка с большой поверхностью и аэрогидродинамически обтекаемой формой, обуславливающей минимальные потери напора за счет местных сопротивлений.

Вопрос о применении того или иного типа насадок для конкретных условий работы скруббера решается экономически. Нужно для данных условий решить, что выгоднее: применить насадку с большим гидравлическим сопротивлением, дающую несколько более высокий коэффициент теплопередачи, и тем самым уменьшить габариты аппаратуры, но увеличить затраты энергии на преодоление сопротивления насадки, или же, взяв насадку с меньшим гидравлическим сопротивлением и меньшим объемным коэффициентом теплопередачи, увеличить размеры аппарата, но сэкономить энергию на преодоление сопротивления системы.

Мерилом экономичности проведения процесса может явиться отношение количества переданного тепла к мощности, затрачиваемой на перемещение газа в насадке.

Приведем для примера сравнительный расчет экономичности некоторых насадок. Для расчета принимаем объем насадки в 1 м^3 , загруженной в скруббер сечением в 1 м^2 ($D=1,13 \text{ м}$) при высоте насадки в 1 м . Насадка — кольца Рашига $35 \times 35 \text{ мм}$; плотность

орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$; скорость воздуха $0,66 \text{ м/сек}$; количество тепла, передаваемого 1 м^3 насадки, $q=1890 \text{ кал/м}^3 \text{ час}$ (согласно табл. 10).

Потеря напора (согласно табл. 11) составляет $16,6 \text{ мм H}_2\text{O}$ на 1 м высоты насадки. Мощность, затрачиваемая на перемещение воздуха через насадку:

$$N = \frac{v_s \cdot \Delta P}{75 \cdot \eta},$$

где v_s — производительность вентилятора в м^3 воздуха в сек.;

ΔP — потеря напора в $\text{мм H}_2\text{O}$ на 1 м высоты слоя насадки;

η — к. п. д. вентилятора принимаем $= 0,5$.

В нашем случае $v_s = 0,66 \text{ м}^3/\text{сек}$;

$\Delta P = 16,60 \text{ мм H}_2\text{O}$;

Таблица 12

Н а с а д к а	Объемный коэффициент теплопередачи в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$	Потеря напора на 1 м насадки в $\text{мм } \Delta P$	Расход мощности в л. с. N	$q/N \text{ кал/м}^3 \text{ } ^\circ\text{C л. с. час}$	Примечание
Кольца Рашига 50×50 , загруженные беспорядочно	1330	8,8	0,1566	8478	Плотность орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$
Кольца Рашига 50×50 , загруженные в шахматном порядке	1180	1,86	0,0327	36085	То же
Кольца Рашига 35×35 , загруженные в беспорядке	1890	16,6	0,292	6233	»
Кольца Рашига 25×25 , загруженные в беспорядке	2240	25,9	0,4558	4912	»
Решетки:					
№ 3, загруженные накрест	950	1,07	0,0188	50532	»
№ 3, загруженные параллельно	1070	0,79	0,0139	76429	Плотность орошения $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$
№ 4, загруженные накрест	704	0,64	0,0113	62300	То же
Кокс = $40,8 \text{ мм}$	1900	16,5	0,2904	6552	Плотность орошения $5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$
Решетки № 3, загруженные накрест	1475	1,07	0,0188	78457	Плотность орошения $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$

$$N = \frac{0,66 \cdot 17,6}{75 \cdot 0,5} = 0,292 \text{ л. с.}$$

$$\text{Отношение } \frac{q}{N} = \frac{1890}{0,292} = 6233 \text{ кал/л. с. час.}$$

Такие же расчеты были произведены при тех же условиях для других типов насадок.

Полученные результаты сведены в табл. 12 (стр. 204).

Из приведенной таблицы видно, что применение решеток более выгодно по сравнению с другими типами насадок. Из колец Рашига, загруженных в беспорядке, наибольшее отношение $\frac{q}{N}$ показали кольца Рашига размером 50×50 .

Для остальных колец, хотя они имеют более высокий объемный коэффициент теплопередачи, сопротивление настолько велико, что затраты энергии на его преодоление будут больше, чем выгоды, получаемые от уменьшения габаритов скруббера (вследствие уменьшения необходимой поверхности теплопередачи) за счет увеличения объемного коэффициента теплопередачи.

Сравнение регулярной загрузки насадки с нерегулярной показывает, что для колец Рашига регулярная укладка (в шахматном порядке) дает безусловное преимущество перед загрузкой в беспорядке.

4. ОПЫТЫ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ВОДОЙ В СКРУББЕРЕ С НАСАДКОЙ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты опытов

Опыты по охлаждению паровоздушной смеси в скруббере были проведены при заполнении его в качестве насадки беспорядочно загруженными керамическими кольцами Рашига размером 25×25 и 35×35 мм и решетками № 3, уложенными накрест. Высота слоя насадки в опытах составляла 950—1000 мм.

Ставилась задача определения значения коэффициентов теплопередачи в зависимости от паросодержания. Поэтому опыты проводились с паровоздушными смесями с отношением объема воздуха к объему водяного пара при нормальных условиях 1:1, 2:1 и 3:1.

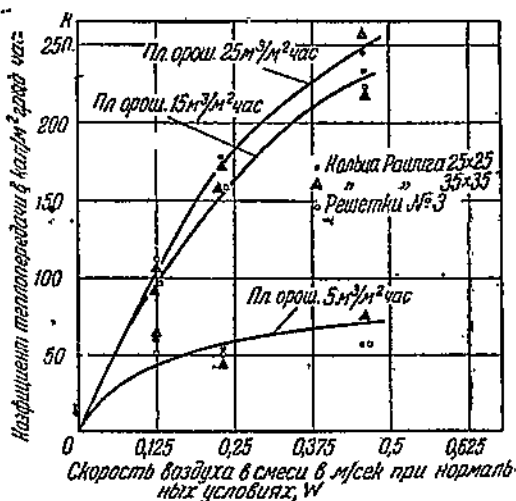


Рис. 89. График зависимости коэффициента теплопередачи от скорости воздуха в смеси для различных насадок. Охлаждение паровоздушной смеси водой. Отношение воздух: пар=1:1. Насадка: кольца Рашига 25×25 и 35×35 мм; решетки № 3.

При работе со всеми смесями исследовались влияние скорости движения воздуха и плотности орошения на величину коэффициента теплопередачи.

Скорость воздуха при всех смесях изменялась от 0,167 до 0,60 м/сек (считая на сухой воздух, относенный к нормальным условиям). Фактическая скорость смеси на входе, конечно, была больше, чем вверх скруббера. По мере конденсации пара при прохождении смеси через скруббер скорость смеси приближалась к скорости движения сухого воздуха.

Плотность орошения в опытах варь-

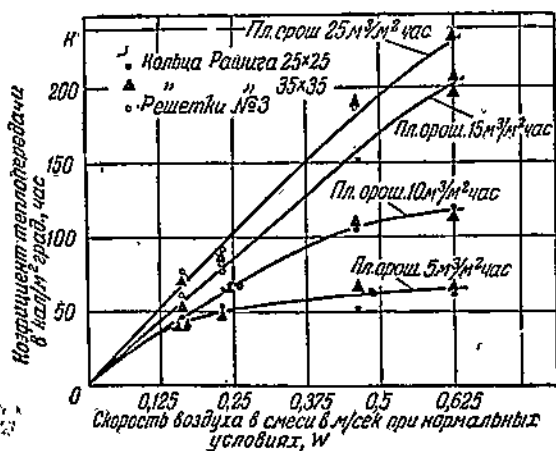


Рис. 90. График зависимости коэффициента теплопередачи от скорости воздуха в смеси для различных насадок. Охлаждение паровоздушной смеси водой. Отношение воздух : пар = 2 : 1,

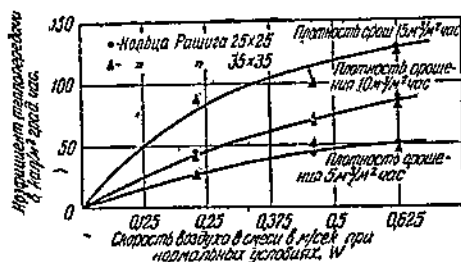


Рис. 91. График зависимости коэффициента теплопередачи от скорости воздуха в смеси для различных насадок. Охлаждение паровоздушной смеси водой. Отношение воздух : пар = 3 : 1.

как и при охлаждении сухого воздуха) примерно одни и те же значения коэффициентов теплопередачи на единицу поверхности насадки.

Значение коэффициентов теплопередачи тем больше, чем больше содержание пара в смеси, но характер их зависимости от скорости воздуха таков же, как для сухого воздуха.

роvala в пределах от 5 до 25 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$.

Результаты опытов сведены в табл. 13, 14 и 15. Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости воздуха в смеси, плотности орошения и паросодержания смеси для различных насадок представлена в графической форме на рис. 89, 90 и 91.

Из таблиц и графиков видно, что различные типы насадок показывали (так же

Таблица 13

Значения коэффициентов теплопередачи при охлаждении паровоздушной смеси водой

Отношение — воздух : пар = 1 : 1

Скорость воздуха в смеси w_0 в м/сек (считая на общее сечение пустого скруббера)	Плотности орошения в $\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$	Коэффициенты теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C час}$ для насадок		
		Кольца Рашига		Решетки № 3 накрест
		25 × 25 мм	35 × 35 мм	
0,46	5	57,5	76,5	—
0,23	5	54,5	63,5	57,8
0,167	5	64,5	65,0	52,2
0,46	15	233	220	221
0,23	15	177	175	123
0,167	15	74,5	94,0	94,0
0,46	25	247	259	280
0,23	25	119	158	157,5
0,167	25	—	108	113,5

Таблица 14

Значения коэффициентов теплопередачи при охлаждении паровоздушной смеси водой

Отношение — воздух : пар = 2 : 1

Скорость воздуха в смеси в м/сек	Плотность орошения в $\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$	Коэффициенты теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C час}$ для насадок:		
		Кольца 25 × 25 мм	Кольца 35 × 35 мм	Решетки № 3 накрест
0,625	5	63,1	65,5	—
0,46	5	51,2	65,5	—
0,23	5	53,1	51,0	—
0,167	5	45,6	45,0	—
0,625	10	119	118	—
0,46	10	106	107	—
0,23	10	65,6	65,0	—
0,167	10	—	42,0	—
0,625	15	—	207	—
0,46	15	—	151	114
0,23	15	—	75	67,8
0,167	15	—	54	60,0
0,625	25	—	231	—
0,46	25	—	189	187,5
0,23	25	—	81,5	93,5
0,167	25	—	71,0	76,7

Таблица 15

Значения коэффициентов теплопередачи при охлаждении паровоздушной смеси водой

Отношение — воздух : пар — 3 : 1

Скорость воздуха в м/сек	Плотность орошения в м ³ /м ² час	Коэффициент теплопередачи в кал/м ² °С час для колец Рашига	
		25×25 мм	35×35 мм
0,60	5	51,5	45,9
0,46	5	43,0	51,5
0,23	5	37,3	26,2
0,60	10	89,0	82,2
0,46	10	69,5	70,0
0,23	10	44,8	43,5
0,60	15	128,5	127,5
0,46	15	85,5	99,0
0,23	15	—	86,5

Обработка и обобщение результатов опытов с паровоздушными смесями

При обобщении результатов опытов по охлаждению паровоздушной смеси водой мы приняли, как и для воздуха, что смесь при движении через насадку проходит каналы с переменным сечением неправильной формы, стенки которых покрыты пленкой движущейся жидкости.

Температура жидкостной пленки ниже точки росы, поэтому на ней происходит конденсация пара, содержащегося в смеси. При этом основное количество тепла, передающегося от паровоздушной смеси жидкости, передается не за счет непосредственного соприкосновения горячей смеси с холодной жидкостью, а за счет конденсации пара на ней. Интенсивная конденсация пара происходит на поверхности жидкостной пленки и, следовательно, парциальное давление пара в ядре потока паровоздушной смеси становится большим, чем у поверхности пленки. Вследствие этого пар из ядра потока начинает диффундировать к поверхности жидкой пленки. Благодаря разности давления у поверхности жидкой пленки и в ядре потока паровоздушной смеси, к поверхности жидкой пленки начинает диффундировать и воздух, создавая тем самым газовый слой, являющийся дополнительным сопротивлением для перехода молекул пара из ядра потока к поверхности жидкой пленки. Таким образом, этот газовый слой создает термическое сопротивление для перехода тепла от паровоздушной смеси к жидкости. Величина этого газового слоя зависит от парциального давления пара в смеси — чем меньше парциальное давление пара, тем интенсивнее будет диффундировать воздух к жидкостной пленке и тем большее сопроти-

вление он будет оказывать переходу тепла от смеси к жидкости. Следовательно, при меньшем паросодержании или — что то же — при большем содержании воздуха в смеси коэффициент теплопередачи будет меньше. Вследствие этого мы в наших опытах получили понижение коэффициента теплопередачи с увеличением количества воздуха в смеси.

Процесс теплопередачи в паровой фазе осуществляется путем диффузии. Это условие будет отражать критерий π , который равен $\frac{r}{c\Delta t}$.

Исходя из вышеизложенного механизма теплопередачи при конденсации пара, содержащего воздух, следует констатировать, что величину коэффициента теплопередачи будет определять еще один фактор — паросодержание, которое мы обозначим через x и будем выражать в долях единицы.

Помимо этого, так как процесс теплопередачи в паровоздушной смеси характеризуется взаимной диффузией воздуха и пара, появляется еще один критерий, определяющий протекание процесса,

а именно $\frac{\nu_{см}}{D}$, где

$\nu_{см}$ — кинематическая вязкость паровоздушной смеси;
 D — коэффициент диффузии.

Следовательно, для процесса теплопередачи от паровоздушной смеси к жидкости в принужденном потоке зависимость между критериями будет характеризоваться следующим уравнением:

$$Ki = f(Re, Pr, \pi, \frac{\nu_{см}}{D}, x). \quad (94)$$

По данным Кутателадзе величина $\frac{\nu_{см}}{D}$ изменяется очень мало и ее можно исключить. Таким образом, связь между критериями выразится уравнениями:

$$Ki = f(Re, Pr, \pi, x). \quad (95)$$

Опыты Кутателадзе по конденсации пара на вертикальной струе жидкости показали, что при количестве образующегося конденсата до 8,4% от количества орошающей воды оказалось возможным пренебречь значением π . Более точные исследования показали, что вообще значение Ki пропорционально $\pi^{0,03}$.

В наших опытах по охлаждению паровоздушной смеси водой максимальное количество выпавшего конденсата при малых плотностях орошения и больших скоростях смеси доходило до 17—20% от количества орошающей воды. При плотностях орошения от $10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ и выше максимальное количество конденсата не превышало 10%.

Исходя из данных Кутателадзе о влиянии критерия π на величину критерия Кирпичева, которое находится в пределах точности наших опытов, мы сочли возможным также исключить величину π в функциональной зависимости между критериями.

Следовательно, окончательно будем иметь:

$$Ki = f(Re, Pr, x). \quad (96)$$

Если представить зависимость между критериями в виде степенной функции, то получим:

$$Ki = c Re^m Pr^n x^e. \quad (97)$$

Показатель степени числа Прандтля $n = 0,33$, следовательно,

$$Ki = c Re^m Pr^{0,33} x^e. \quad (98)$$

Для смеси с определенным содержанием пара величина x^e постоянна и поэтому уравнение (98) примет вид:

$$Ki = a_1 Re^m Pr^{0,33} \quad (99)$$

или

$$\frac{Ki}{Pr^{0,33}} = a_1 Re^m. \quad (100)$$

Критерий Кирпичева $\frac{Kd}{\lambda}$ вычислялся следующим образом: K —коэффициент теплопередачи в $\text{кал/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C час}$ принимался по данным опытов; λ —коэффициент теплопроводности воздуха в $\text{кал/м час } ^\circ\text{C}$; являющийся основным термическим сопротивлением, находился по уравнению Сутерленда

$$\lambda = 0,0192 \lambda_0 \frac{273 + c}{T + c} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

где $c = 125$ при средней температуре смеси; d —диаметр или основной линейный размер системы в данном случае. выражался через эквивалентный диаметр для данной насадки d_s —равный $4m$ —учтенному значению гидравлического радиуса. Числовые значения гидравлического радиуса для различных насадок брались из табл. 3 и 4 с учетом поправок на изменение свободного объема насадки в зависимости от интенсивности орошения, согласно графиков рис. 62 и 64.

Для вычисления числового значения критерия Рейнольдса мы пользовались следующим выражением:

$$Re = \frac{4 \bar{w}_0}{S \nu}.$$

Как уже указывалось выше, основное термическое сопротивление в переходе тепла от паровоздушной смеси составляет воздух, содержащийся в смеси. Наиболее интенсивная конденсация происходит внизу скруббера, в его же верхней части идет процесс охлаждения воздуха, в основном освобожденного от пара.

Строго установить границу между этими двумя областями затруднительно, поэтому мы во всех расчетах условно принимали не скорость смеси, а скорость воздуха, содержащегося в ней. Таким образом, при определении числа Рейнольдса нами бралась скорость воздуха в смеси $\bar{w}_0$ в м/сек , считая на общее сечение скруббера

при средней арифметической температуре смеси или — что то же — при средней температуре воздуха в ней.

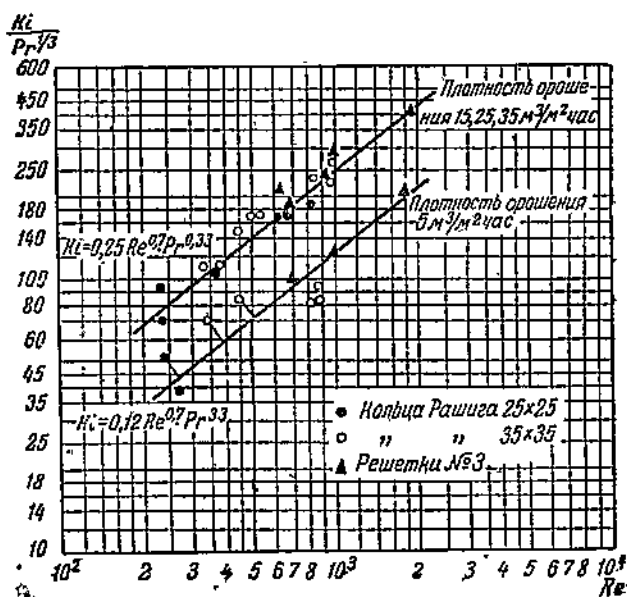


Рис. 92. График $Ki = f(Re, Pr)$ при охлаждении паровоздушной смеси водой. Отношение воздух : пар = 1 : 1.

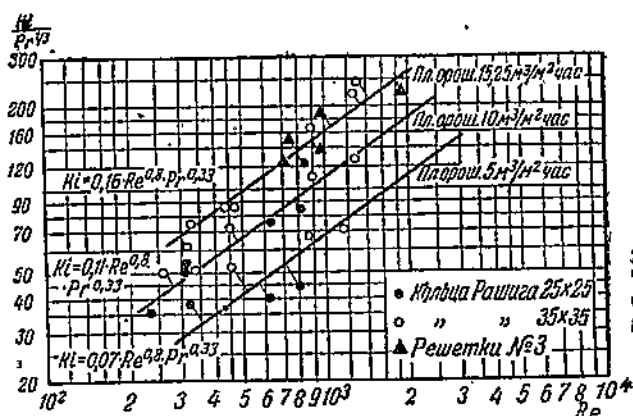


Рис. 93. График $Ki = f(Re, Pr)$ при охлаждении паровоздушной смеси водой. Отношение воздух : пар = 2 : 1.

Критерий Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$,

где ν — коэффициент кинематической вязкости;

α — коэффициент температуропроводности.

Величина Pr при обработке результатов опытов вычислялась при средней арифметической температуре воздуха*).

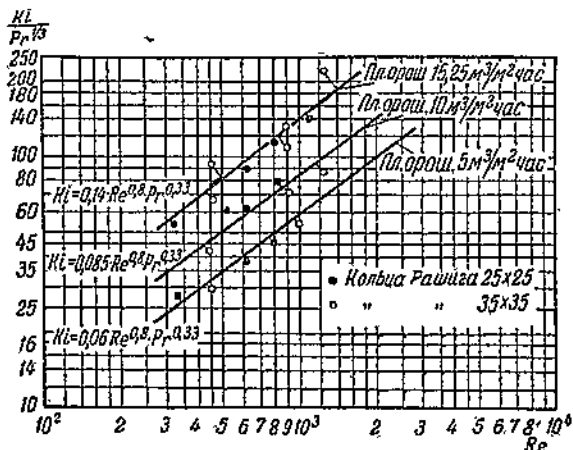


Рис. 94. График $Ki=f(Re, Pr)$ при охлаждении паровоздушной смеси водой. Отношение воздух : пар=3:1.

На рис. 92, 93 и 94 дана в логарифмических координатах зависимость $\frac{Ki}{Pr^{0.33}} = f(Re)$ для смесей с отношением воздуха и пара 1:1, 2:1 и 3:1.

На основании этих графиков были получены следующие уравнения:

Для смеси с отношением объема воздуха к объему пара = 1:1 при плотности орошения 5 м³/м² час:

$$Ki = 0,12 Re^{0.7} Pr^{0.33}; \quad (101)$$

при плотности орошения 15 и 25 м³/м² час:

$$Ki = 0,25 Re^{0.7} Pr^{0.33}. \quad (102)$$

Для смеси с отношением объема воздуха к объему пара = 2:1 при плотности орошения 5 м³/м² час:

$$Ki = 0,07 Re^{0.8} Pr^{0.33}; \quad (103)$$

при плотности орошения 10 м³/м² час:

$$Ki = 0,11 Re^{0.8} Pr^{0.33}; \quad (104)$$

*). В таблицах обычно указывается размерность коэффициента кинематической вязкости в м²/сек, а размерность коэффициента температуропроводности в м²/час. Поэтому при вычислении значения Pr необходимо числовое значение ν умножать на 3600.

при плотности орошения 15 и 25 $\text{м}^3/\text{м}^2$ час:

$$Ki = 0,16 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (105)$$

Для смеси с отношением объема воздуха к объему пара = 3:1 при плотности орошения 5 $\text{м}^3/\text{м}^2$ час:

$$Ki = 0,06 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}; \quad (106)$$

при плотности орошения 10 $\text{м}^3/\text{м}^2$ час:

$$Ki = 0,085 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}; \quad (107)$$

при плотности орошения 15 и 25 $\text{м}^3/\text{м}^2$ час:

$$Ki = 0,14 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (108)$$

Из этих уравнений видно, что для охлаждения паровоздушной смеси так же, как и для охлаждения сухого воздуха водой при различных плотностях орошения для смесей с постоянным паросодержанием, величина Ki зависит от Re в степени 0,8 и Pr в степени 0,33. Коэффициенты же a_1 при различных плотностях орошения различны и увеличиваются с увеличением плотности орошения. В опытах с воздухом нами было найдено, что критерий Кирпичева зависит не только от числа Рейнольдса газа, но и в совершенно одинаковой степени зависит от числа Рейнольдса жидкости — $Re_{ж}$. Такая же зависимость, если построить для всех уравнений график $a_1 = f(Re_{ж})$, имеет место для охлаждения паровоздушной смеси.

В полученных уравнениях для одинаковых плотностей орошения и разных смесей мы имеем разные коэффициенты, причем они тем больше, чем больше содержание пара в смеси, т. е. они являются функцией паросодержания. Поэтому мы для постоянных плотностей орошения построили график зависимости постоянного коэффициента, обозначив его через a от содержания пара в смеси. Содержание пара x выражено в долях единицы (рис. 95).

На основании полученных на графике в логарифмических координатах прямых было установлено, что величина коэффициента a зависит от паросодержания в степени 1,15. Следовательно, функциональная зависимость между критериями выразится с помощью уравнения:

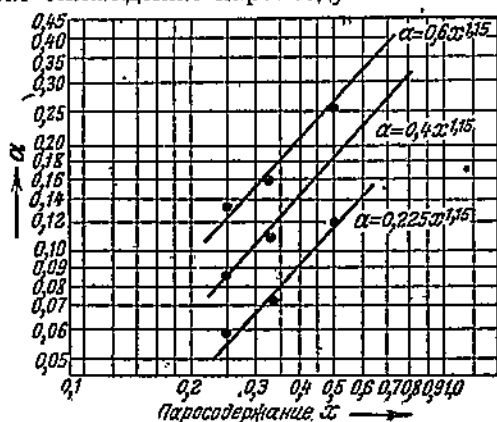


Рис. 95. График зависимости постоянных коэффициентов a в уравнениях (106)–(108) от содержания пара в паровоздушной смеси.

$$Ki = c Re_s^{0,8} \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot x^{1,15} \quad (109)$$

Путем дальнейшей математической обработки было найдено, что окончательное уравнение, характеризующее зависимость критерия Кирпичева от числа Рейнольдса газа, числа Рейнольдса жидкости, числа Прандтля и паросодержания, лучше всего удовлетворяющее экспериментальным данным, имеет следующий вид:

$$Ki = \frac{Kd_s}{\lambda} = 0,17 Re_s^{0,7} \cdot Re_{жс}^{0,7} \cdot Pr^{0,33} \cdot x^{1,15} \quad (110)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 96.

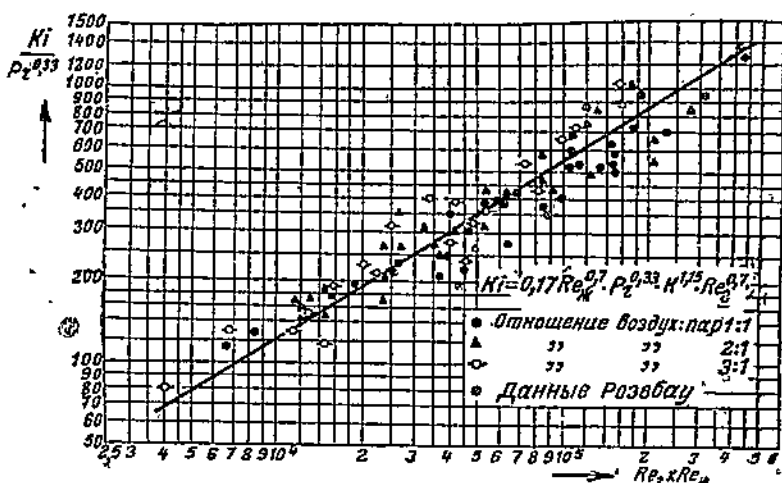


Рис. 96. График $Ki=f(Re_s, Re_{жс}, Pr, x)$ при охлаждении паровоздушных смесей в скруббере с насадкой. Насадки: кольца Рашига размером 25×25 мм и 35×35 мм и решетки № 3.

На график рис. 96 нами были нанесены также точки, полученные путем обработки вышеприведенным методом некоторых экспериментальных данных упоминавшейся выше работы Розебаута⁹¹. Точки достаточно удовлетворительно уложились на нашу прямую. Такое совпадение результатов подтверждает правильность выбранной нами методики исследования и обработки экспериментальных данных. Следует, однако, отметить, что совпадение данных Розебаута с результатами нашей работы имеет место лишь при малых плотностях орошения скруббера водой. По данным Розебаута зависимость коэффициента теплопередачи от интенсивности орошения имеет максимум, соответствующий плотности орошения в $3,9 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ (рис. 81).

Розебаут считает, что при плотности орошения выше $3,9 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ скруббер приближается к состоянию захлебывания, вследствие чего ухудшаются условия теплопередачи и падает величина коэффициента теплопередачи. Однако, это находится в полном противоречии с результатами нашей работы по определению пределов нагрузки скруббера по газу и жидкости.

По нашим данным захлебывание скруббера, заполненного хлоридной насадкой такого типа, с которым работал Розебаут, соответствует плотности орошения порядка $250 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ и выше.

Наличие максимума величины коэффициента теплопередачи в кривых Розебаута (рис. 81) сомнительно и, очевидно, является ошибкой опыта.

Анализируя результаты наших опытов (рис. 89, 90 и 91), мы видим, что, действительно, возрастание коэффициента теплопередачи в зависимости от плотности орошения постепенно уменьшается с увеличением последней. Однако, максимума к. т. п. при плотностях орошения до $25 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ нами обнаружено не было.

На рис. 92, 93 и 94 мы видим, что для плотностей орошения от $15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ и выше точки зависимости критерия Кирпичева от числа Рейнольдса, несмотря на различную величину коэффициентов теплопередачи, лежат на одной прямой.

Полученные нами в результате исследования процесса теплопередачи в скруббере уравнения (92) и (110) могут быть положены в основу проектирования промышленных скрубберов, применяемых для охлаждения как сухого газа, так и смесей газа с водяным паром.

По уравнению (92) можно вычислить коэффициент теплопередачи при непосредственном соприкосновении охлаждаемого газа с охлаждающей водой в скруббере с насадкой. Аналогичным образом уравнение (110) может быть применено для вычисления коэффициента теплопередачи от паро-газовой смеси к охлаждающей воде в конденсаторах, холодильниках скрубберного типа, т. е. для случаев, когда охлаждение газа сопровождается конденсацией содержащихся в нем водяных паров.

По найденным значениям коэффициентов теплопередачи можно рассчитать необходимую для осуществления процесса теплопередачи поверхность скрубберной насадки и определить габариты скруббера.

Критериальная форма полученных уравнений позволяет применить их для вычисления коэффициентов теплопередачи также и для случая нагревания газа в скрубберах и башнях, орошаемых горячей водой. Так, например, уравнение (110) может быть применено для расчета коэффициентов теплопередачи в сатурационных башнях, в которых нагревание газа орошающей горячей водой сопровождается насыщением газа водяными парами.

Физические параметры сухого воздуха при $P=735,5$ мм рт. ст.

Темпера- тура t в $^{\circ}\text{C}$	Удель- вес γ в $\text{кг}/\text{м}^3$	Удель- ная теплосе- мкость C_p в $\text{кал}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$	Коеффи- циент тепло- проводн. $10^3 \lambda$ в $\text{кал}/\text{м}^{\circ}\text{C}$ час	Коеффи- циент темпера- туропро- водности $10^3 \alpha$ в м^2 час	Коеффи- циент вязкости $10^6 \mu$ в кг $\text{сек}/\text{м}^2$	Коеффи- циент кинема- тической вязкости $10^6 \nu$ в $\text{м}^2/\text{сек}$	Крите- рий Прандтля Pr
-180	3,685	0,250	0,65	0,705	0,66	1,76	0,900
-150	2,817	0,248	1,00	1,45	0,89	3,10	0,770
-100	1,984	0,244	1,39	2,88	1,20	5,94	0,742
-50	1,534	0,242	1,75	4,73	1,49	9,54	0,726
-20	1,365	0,241	1,94	5,94	1,66	11,93	0,724
0	1,252	0,241	2,04	6,75	1,75	13,70	0,723
10	1,206	0,241	2,11	7,24	1,81	14,70	0,722
20	1,164	0,242	2,17	7,66	1,86	15,70	0,722
30	1,127	0,242	2,22	8,14	1,91	16,61	0,722
40	1,092	0,242	2,28	8,65	1,96	17,60	0,722
50	1,056	0,243	2,35	9,14	2,00	18,60	0,722
60	1,025	0,243	2,41	9,65	2,05	19,60	0,722
70	0,996	0,243	2,46	10,18	2,08	20,45	0,722
80	0,968	0,244	2,52	10,65	2,14	21,70	0,722
90	0,942	0,244	2,58	11,25	2,20	22,90	0,722
100	0,916	0,244	2,64	11,80	2,22	23,78	0,722
120	0,870	0,245	2,75	12,90	2,32	26,20	0,722
140	0,827	0,245	2,86	14,10	2,40	28,45	0,722
160	0,789	0,246	2,96	15,25	2,46	30,60	0,722
180	0,755	0,247	3,07	16,50	2,55	33,17	0,722
200	0,723	0,247	3,18	17,80	2,64	35,82	0,722
250	0,653	0,249	3,42	21,2	2,85	42,8	0,722
300	0,596	0,250	3,69	24,8	3,03	49,9	0,722
350	0,549	0,252	3,93	28,4	3,21	57,5	0,722
400	0,508	0,253	4,17	32,4	3,36	64,9	0,722
500	0,450	0,256	4,64	40,0	3,69	80,4	0,722
600	0,400	0,260	5,00	49,1	4,00	98,1	0,723
800	0,325	0,266	5,75	68,0	4,54	137,0	0,725
1000	0,268	0,272	6,55	86,9	5,05	185,0	0,727
1200	0,238	0,278	7,27	113,0	5,50	232,5	0,730
1400	0,204	0,284	8,00	138,0	5,89	282,5	0,736
1600	0,182	0,291	8,70	165,5	6,28	338,0	0,740
1800	0,165	0,297	9,40	192,0	6,68	397,0	0,744

Физические параметры воды на линии насыщения

Температура t в $^{\circ}\text{C}$	Давление P в $\text{кг}/\text{м}^2$	Удельный вес γ в $\text{кг}/\text{см}^3$	Теплосодержание i в $\text{кал}/\text{кг}$	Удельная теплоемкость C_p в $\text{кал}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплопроводности λ в $\text{кал}/\text{м}^{\circ}\text{C}^{\circ}\text{C}$	Коэффициент температуропроводности $10^4 \cdot a$ в $\text{м}^2/\text{час}$	Коэффициент вязкости $10^6 \cdot \mu$ в $\text{кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$	Коэффициент кинематической вязкости $10^6 \cdot \nu$ в $\text{м}^2/\text{сек}$	Критерий Прандтля Pr
0	1	999,8	0	1,005	0,480	4,8	182,5	1,790	13,3
10	1	999,6	10,04	1,001	0,484	4,9	133,0	1,300	9,49
20	1	998,2	20,03	0,999	0,510	5,1	102,0	1,000	7,06
30	1	995,6	30,00	0,998	0,525	5,3	81,7	0,805	5,51
40	1	992,2	39,98	0,998	0,539	5,4	66,6	0,659	4,37
50	1	988,0	49,95	0,999	0,552	5,6	56,0	0,556	3,59
60	1	983,2	59,94	0,999	0,565	5,7	48,0	0,479	3,00
70	1	977,7	69,93	1,001	0,574	5,9	41,4	0,415	2,54
80	1	971,8	79,95	1,002	0,581	6,0	36,3	0,366	2,20
90	1	965,3	89,98	1,005	0,585	6,1	32,1	0,326	1,92
100	1,03	958,3	100,04	1,007	0,587	6,1	28,8	0,295	1,72
110	1,46	951,0	110,12	1,010	0,589	6,1	26,0	0,268	1,56
120	2,02	943,1	120,3	1,014	0,590	6,2	23,5	0,24	1,43
130	2,75	934,8	130,4	1,019	0,590	6,2	21,6	0,226	1,37
140	3,68	926,1	140,4	1,025	0,589	6,2	20,0	0,212	1,23
150	4,85	916,9	150,9	1,032	0,588	6,2	18,9	0,202	1,16
160	6,30	907,4	161,3	1,040	0,587	6,2	17,5	0,190	1,10
170	8,08	897,3	171,7	1,048	0,584	6,2	16,6	0,181	1,05
180	10,23	886,9	182,2	1,057	0,580	6,2	15,6	0,173	1,01
190	12,80	876,0	192,8	1,066	0,576	6,2	14,8	0,166	0,97
00	15,86	864,7	203,5	1,078	0,570	6,1	14,1	0,160	0,94

Приложение 3

Важнейшие условные обозначения, принятые в книге

 T сек — время; l м — длина; h, H м — высота; d, D м — диаметр; $d_e = 4m$ м — эквивалентный диаметр; m м — гидравлический радиус;

- $V_{св} \text{ м}^3/\text{м}^3$ — свободный объем насадки;
 $V_n \text{ м}^3$ — полный объем, занимаемый насадкой;
 $V_{\kappa} \text{ м}^3/\text{м}^3$ — объем, занимаемый материалом насадки;
 $V_{жс} \text{ м}^3/\text{м}^3$ — объем жидкости, заполняющей 1 м³ объема, занимаемого насадкой;
 $y_0 \text{ м}$ — средняя толщина пленки жидкости;
 $\bar{F}_a \text{ м}^2/\text{м}^2$ — среднее живое сечение насадки скруббера;
 $F \text{ м}^2$ — площадь сечения потока;
 $S \text{ м}^2/\text{м}^3$ — поверхность насадки в единице занимаемого объема;
 $S \text{ м}$ — смоченный периметр;
 $S' \text{ м}/\text{м}^2$ — омываемый периметр насадки на 1 м² поперечного сечения скруббера;
 $P \text{ кг}/\text{м}^2$ — давление;
 $\Delta P \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ мм вод. столба}$ — общая потеря напора газа на 1 м высоты слоя насадки;
 $\Delta P_T \text{ кг}/\text{м}^2$ — потеря напора газа, обусловленная трением о поверхность насадки;
 $\Delta P_{\text{м}} \text{ кг}/\text{м}^2$ — потеря напора газа, обусловленная местными сопротивлениями (расширение и сжатие газовой струи вследствие неравномерности живого сечения в беспорядочно загруженной насадке);
 $\Delta P_c \text{ кг}/\text{м}^2$ — потеря напора, обусловленная сжатием газовой струи;
 $\Delta P_p \text{ кг}/\text{м}^2$ — потеря напора, обусловленная расширением газовой струи;
 $w \text{ м}/\text{сек}$ — линейная скорость газового потока;
 $\bar{w}_0 \text{ м}/\text{сек}$ — средняя линейная скорость газового потока, отнесенная к полному сечению пустого скруббера;
 $G \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$ — весовая скорость газа;
 $L \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$ — весовая скорость жидкости (плотность орошения);
 $\gamma \text{ кг}/\text{м}^3$ — удельный вес;
 $\rho \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$ — плотность;
 $\mu \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ — коэффициент вязкости;
 $\nu \text{ м}^2/\text{сек}$ — коэффициент кинематической вязкости;
 η — относительная вязкость (по отношению к воде);
 ζ, f' — коэффициент гидравлического сопротивления;
 λ, f_T — коэффициент сопротивления трению;
 $f_{\text{м}}$ — коэффициент местных сопротивлений;
 $g \text{ м}/\text{сек}^2$ — ускорение силы тяжести;
 d_1 — толщина рейки хордовой насадки;
 d_s — расстояние между рейками (шаг);
 d_w — длина рейки;
 $d_{\text{н}}$ — наружный диаметр кольца;
 $d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр кольца;
 $Q \text{ гр}/\text{сек}$ — расход жидкости;
 $K \text{ кал}/\text{м}^2 \text{ час } ^\circ\text{С}$ — коэффициент теплопередачи;
 $t \text{ } ^\circ\text{С}$ — температура;

$\Delta t^{\circ}\text{C}$ — температурный напор; средняя разность температур;

C — теплоемкость;

q кал — количество тепла;

λ кал/м час $^{\circ}\text{C}$ — коэффициент теплопроводности;

α м²/час — коэффициент температуропроводности;

α кал/м² час $^{\circ}\text{C}$ — коэффициент теплоперехода частный коэффициент теплопередачи;

x — паросодержание в долях единицы;

$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$ — критерий Рейнольдса;

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}$ — критерий Эйлера;

$Fr = \frac{w^2}{gd}$ — критерий Фруда;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — критерий Прандтля;

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$Ki = \frac{K \cdot d}{\lambda}$ — критерий Кирпичева;

$\pi = \frac{r}{C \Delta t}$ — критерий конденсации;

$\frac{\nu}{D}$ — критерий, определяющий взаимную диффузию пара и воздуха: ν — кинематическая вязкость;

D — коэффициент диффузии;

$T = \frac{f' w_1^2 \gamma_1}{2g m \gamma_{\infty}} = \frac{f' w_0^2 S \gamma_1}{F_a^2 2g \gamma_{\infty}}$ — критерий, являющийся мерой отношения силы трения газа о пленку жидкости к силе тяжести.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии, 3-е издание. Госхимиздат, М.-Л. 1941.
2. В. Уокер, В. Льюис и В. Мак-Адамс, Типовая химическая аппаратура. Перевод с английского. ОНТИ, 1935.
3. Д. Перри, Справочник инженера химика, т. I. Перевод с английского. 1937.
4. В. Беджер и В. Мак-Кэб, Основные процессы и аппараты химических производств. Перевод с английского. ОНТИ, 1933.
5. К. М. Малин, Технология серной кислоты и серы, т. I и II. ОНТИ, 1935.
6. И. Н. Кузьминых, Технология серной кислоты. ОНТИ, 1937.
7. С. И. Вольфкович, Общая химическая технология, Изд. ВХАЗ им. Ворошилова. Москва, 1940.
8. Д. А. Эпштейн, Химия и технология связанного азота. ОНТИ, 1935.
9. Б. Д. Гинзбург, Газогенераторные установки, 1939.
10. К. А. Поляков и В. Гальцов, «Журнал химической промышленности», № 1 и 19, 1941.
11. М. Илчин и Б. Розвал, К вопросу о методе расчета Браузе, «Химстрой», № 9, 530, 1934.
12. И. Шулятиков, Отчет о работе по обследованию скрубберов подной и медно-аммиачной абсорбции. Гипроазот, 1938.
13. A. Colburn, «Ind. Eng. chemistry», 26, 4, 1934.
14. T. Sherwood and Gilliland, «Ind. Eng. chemistry», 26, 516 и 1093, 1934.
15. T. Sherwood. «Absorption and Extraction» N. Y., 1937.
16. П. А. Семенов, Сорбция газа в тонких слоях жидкости. Диссертация. Военно-Химическая академия им. Ворошилова. Москва, 1941.
17. A. Fairlie, Towers and Packing for Chemical Plants. «Chem. Met. Eng.», 39, 76, 1932.
18. M. Fenske, C. Tongberg and, D. Quiggle, «Ind. Eng. chemistry», 26, № 11, 1169, 1934.
19. К. Малин: а) Абсорбционная характеристика насадки и абсорберов. «Химстрой», № 1, 1934; б) Выбор насадки как метод интенсификации башенной системы. «Химстрой», № 9, 1933.
20. Г. У. Вебб, «Окислы азота». Перевод с английского. ДВНТУ, Харьков, 1932.
21. E. Berl, «Chemische Ingenieurtechnik», II, Berlin I. Springer. 1935.
22. A. Eucken и M. Jakob, «Der chemie ingenieur», т. 1, ч. 1, стр. 132. Akad. Verlag Ges., 1932.
23. F. C. Zeisberg. «Chem. Met. Eng.», 21, 765, 1919 «Trans. Am. Inst. Chem. Eng.», 12, 231 (1919).
24. L. K. Ramsin, Der Gaswiderstand Verschiedener Schüttstoffe. «Wärme», 51, 301, 1928.
25. Известия Теплотехнического института, № 7 (20), 3—6, 1926. Труды 3-го Всесоюзного Теплотехнического съезда, т. 2, вып. 2, 43—51, 1927.
26. C. Blake. «Trans. Am. Inst. Chem. Eng.», 14, 415, 1922.

27. S. P. Burke and W. B. Plummer, Gas Flow through Packed Columns. «Ind. Eng. Chem.» 20, 1196, 1928.
28. C. C. Furnas, Flow of Gases Through of Broken Solids. «U. S. A. Bureau of Mines, Bull.», 307, 1929.
29. C. C. Furnas and T. L. Joseph. «U. S. A. Bureau of Mines Bull.», № 476, 1931.
30. М. А. Шаповалов, «Теория и практика металлургии», № 5/81, 1—9, 1936.
31. A. Wagner, A. Holschuh, W. Barth, Gasdurchlässigkeit von Schutzstoffe, besonders von Hochoffenmollerstoffen. «Archiv d. Eisen Huttenwesens», № 4, 1932.
32. W. Barth u. Esser, Der Druckverlust in geschichtenen Stoffe. «Forschung Ind. Wesens», 4, № 2, 82, 1933.
33. T. H. Chilton and A. Colburn. Pressur drop in Packed Tubes. «Ind. Eng. Chem.», 23, 914, 1936.
34. Н. М. Жаворонков, «Изучение потерь давления и пределов нагрузки по газу и жидкости скрубберов и башен, заполненных насадкой». Отчет в Гос. институте азота. Москва, 1937.
35. I. Arnoold. «Chem. et Industrie» 21, 478, 1928.
36. A. E. New. «University of North Carolina Undergraduate Research», 1934.
37. W. B. Rose a. F. D. Higby. «Univer. of N. Carolina Undergraduate Research», 1934.
38. Laxton a. Huber. «Un. of N. Carol. Und. Research», 1934.
39. A. Mc. Laren White. Pressur Drop and Loading Velocities in Packed Columnus. «Transactions of the Amer. Inst. of Chem. Eng.» Vol. XXXI. 390—408, 1936.
40. E. Mach, Druckverluste und Belastungsgrenzen Füllkörpersäulen. «Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens», 1935, Forschungheft, 375.
41. Н. М. Жаворонков, Изучение явлений гидравлического порядка в абсорбционных скрубберных процессах. Москва, 1937. Отчет о работе по договору с Союзхимстроймонтажем. Фонд НИР МХТИ.
42. De Jussieux. «Chimic et Industrie», 21, № 3, 478—482, 1929.
43. К. Ф. Павлов и П. С. Семенов, Гидравлика в химической аппаратуре, вып. 1, ч. 2, стр. 52, изд. ВНИТО Химиков, Москва, 1934.
44. К. Ф. Павлов, Атлас диаграмм по расчетам химической аппаратуры. Ленинград, 1941.
45. H. F. Jonstone and A. D. Singh. «Ind. Eng. Chemistry», 29, № 3, 286, 1937.
46. S. Ushida and S. Fujita. «The Journal of the Sosiety of Chemical Industry of Japan», 37, № 11, 724 В и 456 В, 1934.
47. То же, 38, 625 В, 1935; 39, 11, 432—441, 1936.
48. То же, 40, № 7, 238—244, 1937; 41, № 3, 275 В — 288, 1938.
49. И. Н. Кузьминых и И. А. Апахов, Сопротивление башенных насадок газовому потоку. «Промышленность органической химии», № 4—5, 257, 1940.
50. Юшманов, «Химическое машиностроение», № 7, 22, 1940.
51. E. L. Piget, Ch. A. Maclay and Th. Wall, Pressure Drop and Liquid Holdup in a Packed Tower. «Ind. Eng. Chem.», 32, № 6, 861, 1940.
52. Kirschbaum, «Dechema Monographie», 57—66, 7, 155, 1935.
53. M. Rogers and E. Tiell. Pressure Drop in Bubble Cap Columnus. «Ind. Eng. Chem.», 26, № 5, 524, 1934.
54. Н. М. Жаворонков и Я. Д. Зельвенский, Коэффициенты абсорбции углекислоты водой в башнях с насадкой. «Журнал химической промышленности», XII, № 5, 472 и № 6, 565, 1935.
55. Н. М. Жаворонков и Я. Д. Зельвенский, Изучение процесса абсорбции углекислоты водой на опытных и промышленных скрубберах. «Журнал химической промышленности» XIII, № 10, 582, 1936.
56. В. А. Каржавин и И. Г. Дрейцер, Динамические коэффициенты абсорбции углекислоты морской водой, Фонд научно-исследовательских работ Государственного института азота 1936—37 г.

57. T. S. Backer, T. Chilton and H. Vernon. «Transact. Am. Inst. chem. Eng.», 31, 226, 1937.
58. Цитирется по T. Sherwood'у «Absorption and Extraction N. 1, 1937.
59. T. K. Sherwood, G. H. Shipley and F. A. Holloway. Flooding Velocities in Packed Columns. «Ind. Eng. Chem.», № 7, 765—769, 1938.
60. T. Sherwood and F. Jenny. «Ind. Eng. chem.» 27, № 8, 265, 1935.
61. Kirschbaum, Neue Fragen und Erkenntnisse aus der Rectifikationstechnik «V. D. I.», 75, 1212, 1931.
62. Simmons and Osborn. «Ind. Eng. Chem.» 26, № 5, 529, 1934.
63. Mayo, Hunter and Nash «Chem. and Ind.» № 46, 375—385, 1937.
64. Handbuch der Experimentalphysik von W. Wien und F. Harms. B. IV, Teil 4. Hydro- und Aerodynamik. Strömung in Röhren von L. Schiller. Leipzig, 1932. Русский перевод Л. Шиллер, Движение жидкостей в трубах. ОНТИ, М.-Л. 1936.
65. J. Nikuradse. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren, Forschungsheft 356. Beilage zu Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 1932. Русский перевод в сборнике «Проблемы турбулентности» под редакцией М. А. Великанова и И. Т. Швейковского. ОНТИ: М.-Л. 1936, стр. 75—150.
66. C. H. Lees. Proc. Roy. Soc. London, (A) T. XCI, 46, 1915.
67. M. Jakob und S. Erk. «Forschungsarbeiten Heft», 267.
68. L. Schiller. Rohr widerstand bei hohen Reynoldsschen Zahlen. Aachen Vortrage. Springer, Berlin, 69, 1930.
- R. Hermann. Experimentelle Untersuchung zum Widerstandgesetz des Kreisröhren bei hohen Reynoldsschen Zahlen. Dissertation. Leipzig. 1929.
- R. Hermann and Th. Burbach. Stromungswiderstand und Wärmeübergang in Röhren. Akad. Verlagsgesellschaft. Leipzig, 1930.
69. L. Hopf. Die Messung der hydraulischen Rauigkeit.
- K. Fromm Stromungswiderstand in rauen Röhren. Zeitschrift für angew. Mathem. und Mechanik. «V. D. I.», Bd. 111, 1923, Heft 5.
70. J. Nikuradse, Forschung aus dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1933.
71. В. Н. Сучков, К расчету процессов абсорбции газов жидкостями. Диссертация. Московский Институт Химического Машиностроения, 1940.
72. Kowalke, Hogen and Watson. «Bull. Univ. Wisc., Eng. Exp.» S. V. VI № 68, 1925.
73. Cooper, Drew and Mc. Adams. «Ind. Eng. Chem.» 26, 428, 1934.
74. Hopf. «Ann. Physik», 32, 777, 1910.
75. Schoklitch, Sitzber. Akad. Wiss. Wien. Math.-Natur. Klasse Abt. IIa, 129, 895, 1920.
76. Classen, «Zentr. Zuckerindustrie», 26, 497, 1918.
77. Chwang. C. T. S. M. Thesis Mass. Inst. Tech., 1928.
78. Kirkbride «Ind. Eng. chem.», 26, № 4, 428, 1934.
79. Hunter, Fallah and Nash. «I. Soc. Chem. Ind.», 53, 369, 1934.
80. S. I. Friedman and C. O. Miller. «Ind. Eng. Chemistry», 33, 885, 1941.
81. Nusselt. «Z. Ver. Deut. Ing.», 605, 541, 569, 1916.
82. Н. М. Жаворонков и В. И. Зильбер, Изучение смачиваемости скрубберных насадок. Отчет о работе по договору с Гос. Инстр. Азота, 1941. Фонд НИР МХТИ им. Менделеева.
83. Н. М. Жаворонков и И. Э. Фурмер, Изучение теплопередачи в теплообменниках смешения скрубберного типа (по договору с Главазотом НКХП), Фонд НИР МХТИ им. Менделеева, 1941.
- И. Э. Фурмер, Кандидатская диссертация. МХТИ им. Менделеева, 1941.
84. С. С. Кутателадзе, Теплопередача при изменении агрегатного состояния (основы теории). Машгиз. 1939.
85. D. Othmer, «Ind. Eng. Chemistry», 6, 1929.
86. Lang, Forschung, Bd 5, 1934.

87. Гудымчук. «Известия ВТИ», 12, 1935.
88. Furnas «Ind. Eng. Chem.», 1, 26, 1930.
89. A. Solborg and W. King «Ind. Eng. Chem.», 23, № 8, 1931.
90. Матвеев. «Химическое машиностроение», № 1, 1940.
91. Rosebough. Chem. Met. Eng., № 3, 1928.
92. И. Л. Пейсахов, Б. А. Чертков. «Ж. Х. П.», т. XVII, № 9, 1940.
93. А. А. Грогolini и Ф. И. Рудометкин. «Холодильная техника», Сборник работ ВНИХИ, 1940.
94. Merkel. «Mitt. Forschungsarb.», 275, 1, 1925.
95. Geibel. «Mitt. Forschungsarb.», 242, 1, 1921.
96. Л. Д. Берман, «Теплосиловое хозяйство», № 7, 1938.
97. E. Simons. «Chem. Met. Eng.», № 2, 3, 4, 1938.
98. Таганов. «Химическое машиностроение», № 2, 1936.
99. М. В. Кирпичев, М. А. Михеев и Л. С. Эйгенсон, Теплопередача, Энергоиздат, М.-Л. 1940.
100. М. В. Кирпичев, М. А. Михеев, Моделирование теплосиловых устройств. Изд. Акад. Наук СССР, 1936.
101. Г. М. Ключев и В. С. Чиркин, Краткий курс теплопередачи, Оборонгиз, 1941.
102. В. Мак-Адамс, Теплопередача: Перевод с англ. ОНТИ, М.-Л. 1937.
103. Л. М. Мариенбах, Теория и конструкция заводских печей, ГНТИ, Л. 1940.
104. Д. Б. Нагорский, Общая методика расчета печей. Акад. Наук СССР, 1941. М.-Л.
105. Миневич, Нагревательные печи термических цехов, 1939—40.
106. Справочник коксо-химика, т. 1, ч. 3, ДНТБУ, Х-К, 1936.
107. С. Н. Обрядчиков и Т. П. Хохряков, Расчет и конструкция ректификационных колонн для нефтезаводских установок. ОНТИ, М.-Л. 1934.
108. Проблемы турбулентности. Сборник переводных статей под редакцией М. А. Великовского и Н. Т. Швейковского. ОНТИ, М.-Л. 1936.
109. П. Л. Давидсон, Гидродинамика теплопроводов и воздухопроводов. ОНТИ, М.-Л. 1936.
110. В. Л. Александров, Техническая гидродинамика, ОНТИ, М. 1932.
111. М. Е. Дойно, Курс гидравлики, ОНТИ, М.-Л. 1936.
112. Отт, Гидравлика. ОНТИ, М.-Л. 1937.
113. Форхгеймер, Гидравлика. ОНТИ, М.-Л. 1935.
114. Павловский, Гидравлический справочник, ОНТИ, М.-Л. 1937.
115. Н. М. Жаворонков, Изучение гидродинамики скрубберного процесса и теплопередачи в скрубберах. Диссертация МХТИ им. Д. И. Менделеева. Москва, 1942.

ЦЕНТРАЛЬНАЯ
 БИБЛИОТЕКА
 АКАДЕМИИ
 НАУК СССР

От автора	3
---------------------	---

Глава I

Сущность скрубберного процесса и задачи данного исследования

1. Назначение, устройство и классификация скрубберов	4
2. Башни с насадкой или скрубберы.	9
3. Сравнительная оценка различных конструкций абсорберов.	15
4. Постановка задачи и цель данного исследования.	17

Глава II

Характеристика наиболее употребительных типов скрубберных насадок

1. Требования, предъявляемые к скрубберным насадкам.	23
2. Типы скрубберных насадок	28
3. Типы насадок, принятые в данном исследовании, и определение их основных параметров.	33

Глава III

Гидравлическое сопротивление скрубберных насадок, пределы нагрузки скрубберов по газу и жидкости («захлебывание») и количество жидкости, удерживаемое насадкой

1. Обзор литературы	45
2. Описание экспериментальной установки и методики проведения опытов	71
3. Основные данные гидродинамики трубопроводов в приложении к скрубберному процессу.	82
4. Теоретическое уравнение для потери напора газа при движении через сухую (порошаемую) скрубберную насадку в изотермических условиях.	95
5. Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению скрубберных насадок и обобщение результатов.	103
6. Пределы нагрузки скрубберов по газу и жидкости.	140
7. Количество жидкости, находящейся в насадке во время работы скруббера, и ее влияние на свободный объем	149

Глава IV

Активная смоченная поверхность и средняя толщина пленки жидкости стекающей по насадке

1. Прямое определение активной смоченной поверхности насадки.	156
2. Средняя толщина пленки жидкости при свободном течении по наклонной плоскости.	161
3. Распределение орошающей жидкости в насадке по сечению и высоте скруббера.	177

Глава V

Теплопередача в скрубберах

1. Теоретические предпосылки и обзор литературы по теплопередаче в башнях и скрубберах.	179
2. Описание экспериментальной установки и методики исследования	189
3. Опыты по охлаждению воздуха водой в скруббере с насадкой и обобщенные результаты.	193
4. Опыты по охлаждению паровоздушных смесей водой в скруббере с насадкой и обобщение результатов.	205
Приложения	216
Использованная литература	220