

УДК 621.593

**Ю.П. Блазнин\*, В.А. Горохов, В.М. Голубев**

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

\*e-mail: blaznin@cryogenmash.ru

## БЛОКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ОАО «КРИОГЕНМАШ»: МЕТОДЫ РАСЧЁТА, КОНСТРУКЦИИ, ОПЫТ ПУСКОНАЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Блоки комплексной очистки (БКО) являются неотъемлемой частью современной воздуходелительной установки (ВРУ). Они предназначены для глубокой очистки воздуха от примесей перед его низкотемпературным разделением. Внедрение этой технологии очистки в ВРУ большой производительности потребовало проведения комплекса исследовательских и опытно-конструкторских работ. Детально исследованы процессы адсорбции, регенерации и поля скоростей воздуха и регенерирующего газа в адсорбционных слоях. Созданы методы расчёта БКО. Разработаны различные конструкции адсорберов и проведены их опытно-промышленные испытания. Установки производительностью до 205 тыс. нм<sup>3</sup>/ч с новыми БКО освоены в производстве и внедрены на ряде предприятий. Получен ценный опыт пусконаладки и эксплуатации. Приведены результаты выполненных работ, определившие технические решения, принятые при создании БКО для ВРУ нового поколения ОАО «Криогенмаш».*

**Ключевые слова:** Воздуходелительная установка. Очистка воздуха. Адсорбция. Регенерация. Аэродинамика движения потоков в адсорбционных слоях. Конструкция адсорберов. Схемы. Пусконаладка. Эксплуатация.

**Yu.P. Blaznin, V.A. Gorokhov, V.M. Golubev**

## FRONT-END PURIFICATION UNITS FOR AIR SEPARATION PLANTS MADDING BY JSC «CRYOGENMASH»: METHODS OF CALCULATION, DESIGN, EXPERIENCE OF COMMISSIONING AND OPERATION

*Front-end purification units (FEPU) are an integral part of a modern air separation plant (ASP) and are intended for air deep purification from the impurities before its low-temperature separation. The above purification process implementation at high-capacity ASP required carrying out of a great scope of comprehensive sophisticated research and design works. Adsorptive layers adsorption, regeneration and aerodynamics processes of regenerating gases have been studied in details. The purification units calculation procedures have been developed. Various designs of adsorbers have been developed and their experimental and industrial testing has been performed. The plants of up to 205 thousand nm<sup>3</sup>/h equipped with new front-end purification units have been mastered at JSC «Cryogenmash» production facilities and implemented at a number of enterprises. The company possesses a certain experience in the equipment commissioning and operation. Some results of executed works that determined the engineering solutions adopted in the process of developing FEPU for JSC «Cryogenmash» new ASP are stated.*

**Keywords:** Air separation plant. Air purification. Adsorption. Regeneration. Aerodynamics of flow movement at absorption layers. Adsorbers design. Circuits. Commissioning. Operation.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современных воздуходелительных установках (ВРУ) единственный способ очистки воздуха от примесей, обеспечивающий работоспособность низкотемпературных аппаратов, арматуры и машинного

оборудования, а также безопасную их эксплуатацию — использование адсорбционных процессов при положительных температурах в блоках комплексной очистки. Очистка воздуха от влаги, диоксида углерода и взрывоопасных примесей посредством адсорбции стала использоваться в ВРУ с середины шестидеся-

тых годов прошлого столетия. В эти годы она применялась в основном в установках малой и средней производительности, работающих по циклам среднего и высокого давлений. В ВРУ низкого давления большой производительности очистка от влаги и  $\text{CO}_2$  осуществлялась вымораживанием их в регенераторах или в реверсивных теплообменниках. Это объяснялось тем, что технология комплексной очистки не была достаточно совершенной и поэтому требовала значительных капитальных вложений и существенных энергетических затрат.

При использовании блока комплексной очистки (БКО) в составе ВРУ, требования к надёжности его работы и качеству очистки воздуха очень высоки. Достаточно сказать, что для обеспечения непрерывной работы ВРУ в течение 2-3 лет остаточное содержание каждой из вымерзающих примесей должно быть на уровне  $1 \cdot 10^{-6}$  % (объёмн.). Даже незначительные отклонения в параметрах работы БКО могут быть причиной неработоспособности ВРУ в целом. Поэтому с конца семидесятых годов ведущие зарубежные фирмы и ОАО «Криогенмаш» начали реализовывать обширные программы по совершенствованию процессов комплексной очистки и их оптимизации.

Исследовательские и опытно-конструкторские работы велись в основном в двух направлениях. Первое — это переход на короткие адсорбционные слои и, в связи с этим, малый цикл адсорбции (2-3 ч). И второе — это использование при проведении процесса регенерации режима термоимпульса, когда в адсорбер вносится то количество тепла, которое необходимо только для десорбции примесей. Реализация этих решений позволила существенно сократить и капитальные, и энергетические затраты на адсорбционную комплексную очистку, которая стала конкурентоспособной при её использовании в установках низкого давления большой производительности.

Преимущества этого способа очистки были настолько привлекательны, что его внедрение за рубежом шло довольно интенсивно. В отечественной практике переход на комплексную очистку воздуха в крупных установках не получил должного развития из-за отсутствия производства пластинчато-ребристых теплообменников. Широкое применение БКО в отечественных ВРУ в связи с этим началось с конца девяностых годов.

В настоящей работе изложены направления и результаты НИР и ОКР, выполненных в ОАО «Криогенмаш» и позволивших обеспечить, начиная с 2000 г., создание ВРУ, отвечающих современному мировому техническому уровню.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЧИСТКИ

Основные направления исследований касались более детального изучения адсорбционного процесса, условий проведения процесса регенерации и аэродинамики адсорбционных аппаратов. Некоторые результаты исследований представлены в работе [1].

Особенность изучаемого процесса адсорбции заключалась в том, что, во-первых, при комплексной очистке происходит адсорбция большого числа примесей. Поэтому, прежде всего, предстояло ответить на вопросы, каковы адсорбционные характеристики различных цеолитов типа NaX по отношению к влаге и диоксиду углерода и как эти примеси влияют друг на друга при адсорбции. Во-вторых, сокращение времени защитного действия адсорберов до 2-3 ч достигалось переходом на адсорбционные слои малой длины. Переход на короткие адсорбционные слои требовал более глубоких знаний, как по адсорбционному равновесию на цеолитах основных примесей воздуха, так и по кинетике их адсорбции. Последнее объясняется тем, что в коротких слоях зона массообмена — адсорбционный фронт по протяжённости становится соизмеримой с длиной адсорбционного слоя.

В результате проведённых исследований получены зависимости для расчёта изотерм адсорбции влаги и диоксида углерода на различных цеолитах типа NaX с учётом их качества, определяемого по специальной методике [2].

Было установлено, что даже небольшое количество адсорбированной воды существенно ухудшает адсорбцию  $\text{CO}_2$ . Так, поглощение адсорбентом воды в количестве всего 1 % (масс.) снижает его адсорбционную ёмкость по  $\text{CO}_2$  почти в 2 раза. Определено, что для нормального функционирования БКО количество влаги на цеолите не должно превышать 0,3 % (масс.). Полученный результат позволил сделать два вывода. Первый — при комплексной очистке на синтетических цеолитах адсорбцию и десорбцию паров воды и диоксида углерода можно рассматривать отдельно. Второй — в зоне, где происходит адсорбция  $\text{CO}_2$  цеолит должен быть тщательно отрегенирован от воды. Операция удаления влаги должна проводиться на этапе подготовки блоков комплексной очистки к работе. Полученные данные позволили сформулировать требования к проведению этой операции по температуре, расходу регенирующего газа и времени её проведения. В процессе работы БКО режим должен быть таков, чтобы влага не попадала в зону адсорбции  $\text{CO}_2$ .

Исследовались также влияния других примесей, в основном углеводородов, на адсорбцию  $\text{CO}_2$ . Опыты показали, что при увеличении содержания углеводородных примесей (пропана до 100 ppm, пропилена и н-бутана до 10 ppm, ацетилен до 70 ppm) величина адсорбции диоксида углерода не изменяется.

Экспериментальное исследование кинетики адсорбции диоксида углерода проводилось в диапазоне изменения давления очищаемого воздуха от 0,6 до 20 МПа, скорости потока от 0,003 до 0,4 м/с, длины адсорбционного слоя от 0,3 до 4 м, диаметра гранул адсорбента от 1,6 до 4,5 мм. С использованием полученных данных расчёт динамики адсорбции выполняется по уравнениям в форме уравнения ЖЗТ для ленгмюровской изотермы.

Опыты по комплексной очистке воздуха позволили установить последовательность проскока примесей через адсорбер. К моменту проскока  $\text{CO}_2$  в очи-

ценном воздухе присутствуют метан, этан, этилен и пропан. Остальные примеси, такие как, например, пропилен, н-бутан и ацетилен, не обнаруживаются при пороге чувствительности анализа  $1 \cdot 10^{-4}$  ppm. При очистке воздуха в БКО метан ( $\text{CH}_4$ ) и этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) не адсорбируются. Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) задерживается на 90 % и этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) на 97 %. Остальные углеводороды, в том числе ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), адсорбируются полностью. Однако, учитывая то, что основное количество метана вследствие сравнительно высокого давления его насыщенных паров при 90 К в газовой фазе удаляется из основного конденсатора, в жидком кислороде могут концентрироваться лишь этан, незначительные количества пропана и этилена. Так как эти углеводороды хорошо растворяются в жидком кислороде ( $\text{C}_3\text{H}_8$  — до 1 мол. %;  $\text{C}_2\text{H}_4$  — до 2 мол. %;  $\text{C}_2\text{H}_6$  — до 12 мол. % и  $\text{CH}_4$  — более 12 мол. %), то они не представляют серьёзной опасности. Поэтому ВРУ с БКО можно считать наиболее защищёнными.

При проведении исследований процесса регенерации основное внимание было уделено снижению энергозатрат на проведение этой операции. На первых этапах работ рассматривалась возможность снижения температуры десорбции примесей. Было установлено [3], что из цеолита основная примесь, которой является диоксид углерода и которая определяет время защитного действия адсорбера, практически полностью удаляется уже при температурах около  $150^\circ\text{C}$ , в то время как для десорбции влаги необходима температура около  $300^\circ\text{C}$ . Что касается углеводородов, то экспериментально установлено, что этилен и пропан выделяются практически при температуре около  $20^\circ\text{C}$ , десорбция бутана заканчивается примерно при  $40^\circ\text{C}$ , основная масса пропилена удаляется в интервале температур  $35\text{--}50^\circ\text{C}$ , бутилены — от  $45$  до  $80^\circ\text{C}$ , ацетилен выделяется в интервале температур  $40\text{--}70^\circ\text{C}$ . Таким образом, десорбция основных примесей в воздухе, кроме воды, из цеолитов типа NaX заканчивается при температурах, не превышающих  $150^\circ\text{C}$ .

Эти обстоятельства определили пути совершенствования процесса регенерации с целью снижения энергозатрат. Одно из направлений использовало модель раздельной адсорбции влаги и  $\text{CO}_2$ , полученную при исследованиях процесса адсорбции, а также способность других адсорбентов, таких как силикагель или оксид алюминия, десорбировать поглощённую влагу при температурах, не превышающих  $200\text{--}250^\circ\text{C}$ . Так появился вариант комплексной очистки воздуха на двухслойных адсорбционных насадках, где адсорбция влаги осуществляется на оксиде алюминия, а адсорбция других примесей — на цеолите. Инертность оксида алюминия к кислотам и слабая кислотостойкость цеолита придавали двухслойной адсорбционной насадке ещё одно преимущество: она увеличивала срок службы цеолита при комплексной очистке воздуха в условиях содержания в нём кислотообразующих окислов.

Как уже указывалось, нормальная адсорбционная ёмкость цеолита по диоксиду углерода обеспечивает-

ся при содержании влаги в цеолите менее 0,3 % (масс.). Это условие соблюдается, если воздух после оксида алюминия будет иметь точку росы не выше  $-70^\circ\text{C}$ , а накопление этой остаточной влаги в цеолите исключается. опыты позволили установить, что указанная работа двухслойной адсорбционной насадки может быть обеспечена при температурах её регенерации  $120\text{--}150^\circ\text{C}$ . Дальнейшие исследования показали, что снижение температуры регенерации возможно и в случае использования однослойной цеолитовой адсорбционной насадки. В этом случае важно, чтобы зона адсорбции влаги оставалась от цикла к циклу постоянной. Соблюдение этого условия может быть достигнуто при температурах уже  $180\text{--}220^\circ\text{C}$ .

Второе направление снижения энергозатрат — это сокращение времени нагрева адсорбционного слоя. Оно реализовывалось при применении регенерации в режиме термоимпульса, когда нет необходимости прогревать весь слой до стабилизации температуры, а регенерацию можно закончить, прекратив подачу горячего регенерирующего газа раньше. Было показано, что при такой регенерации возможна стабилизация фронта адсорбции воды и нераспространение его в зону адсорбции  $\text{CO}_2$  даже при неполном удалении влаги из слоя [4]. В дальнейшем условия такой регенерации были определены для однослойных и двухслойных насадок. Для этого при циклической регенерации термоимпульсом в адсорбер с регенерирующим газом при определённой температуре должно быть, с небольшим избытком, внесено такое количество тепла, которое необходимо для десорбции влаги и диоксида углерода, а расход регенерирующего газа должен быть достаточным для выноса из слоя десорбированных примесей. Оставался неясным только вопрос, как при пониженных температурах регенерации и режиме термоимпульса будут вести себя углеводороды, особенно с содержанием 4-ёх и более атомов углерода, труднее всего удаляемые при регенерации. Поэтому были проведены специальные опыты. В качестве типичного углеводорода оговорённой группы был выбран пентан. Экспериментально установлено, что при содержании пентана в воздухе на входе в БКО на уровне 2 ppm накопления этого углеводорода при регенерации в режиме термоимпульса не происходит. Накапливается он на адсорбенте только при более высоких концентрациях. Это требует периодического проведения регенерации при более высокой температуре, как правило, выполняемой по окончании рабочей смены ВРУ.

Таким образом, в результате исследований процессов тепло- и массообмена при адсорбционной комплексной очистке воздуха была установлена и доказана достаточно сложная и однозначная взаимосвязь между параметрами адсорбции и регенерации. Наличие этой взаимосвязи не допускает произвольного выбора параметров процесса. В противном случае или капитальные и энергетические затраты будут неоправданно большими, или процесс очистки станет трудно реализуем.

Результаты научных исследований легли в основу

специальных методов проектного и поверочного расчётов БКО, которые в настоящее время используются нами при проектировании. В качестве примера на рис. 1 представлена блок-схема проектного расчёта БКО.

### 3. ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ АДСОРБЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Переход на адсорбционные слои малой длины и больших проходных сечений (для установок разделения большой производительности) требовал более детального изучения аэродинамики промышленных адсорбционных аппаратов, включающего в себя определение предельно допустимых скоростей потоков по адсорбционному слою и их распределения по рабочему сечению.

Предельно допустимые скорости очищаемого и регенерирующего потоков, исключающих повышенный износ сорбентов, определяются на основе рассмотрения особенностей псевдооживления частиц в полидис-

перном зернистом слое. Расчёт предельно допустимых скоростей проводится с использованием уравнения Эргана, наиболее часто применяемого в расчётной практике псевдооживления зернистых слоёв.

Существенным вопросом аэродинамики адсорбционных аппаратов является распределение потоков по сечению адсорбционного слоя. Увеличение скорости в какой-либо части адсорбционного слоя снижает эффективность его работы из-за более раннего проскока примесей в этой части слоя. Выполненные исследования позволили установить, что в промышленных адсорбционных аппаратах гидродинамическая неоднородность может быть порождена как условиями ввода и вывода потоков в аппараты, так и самим адсорбционным слоем. Экспериментально показано, что в адсорбционном слое имеются гидродинамические неоднородности двух видов: крупно- и мелкомасштабные. Первая порождена конфигурацией слоя и неоднородностью упаковки адсорбента при загрузке в аппарат и его последующего уплотнения. Мелкомас-

штабная или пристенная неоднородность проявляет себя вблизи стенки аппарата из-за особенностей упаковки частиц сорбента в этой области [5]. Экспериментально и расчётно-теоретическим путём установлено, что в зависимости от конструкции аппарата влияние каждого вида неоднородности проявляется по-разному.

С использованием результатов исследований разработаны и экспериментально проверены различные конструкции аппаратов. Некоторые конструктивные схемы аппаратов с двухслойной адсорбционной насадкой представлены на рис. 2.

Адсорбер типа, как на рис. 2,а, представляет собой аппарат с осевым током газов. Он имеет плоскую нижнюю решётку и кольцевой коллектор для выхода очищенного газа из адсорбера. Такой коллектор позволяет исключить влияние

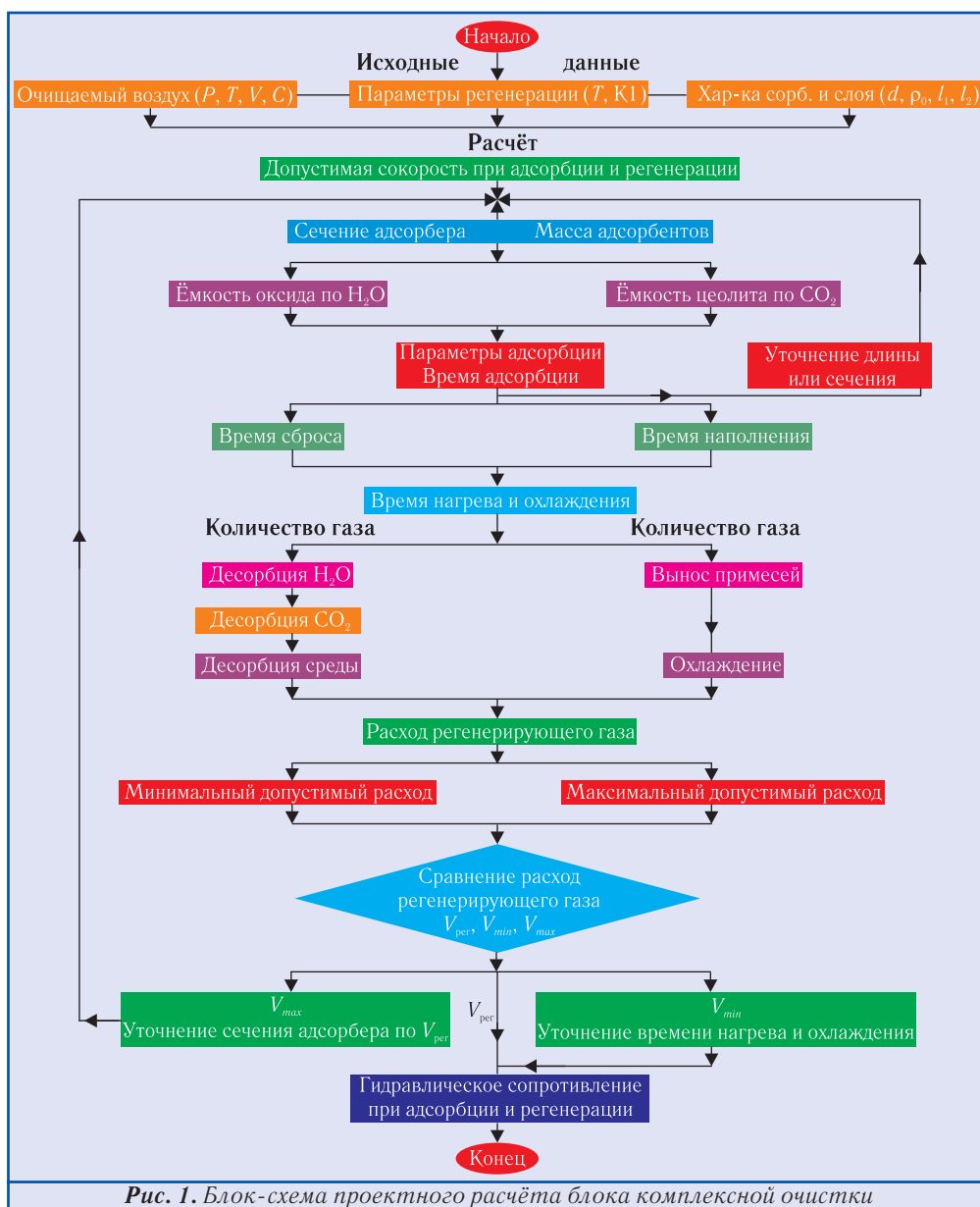
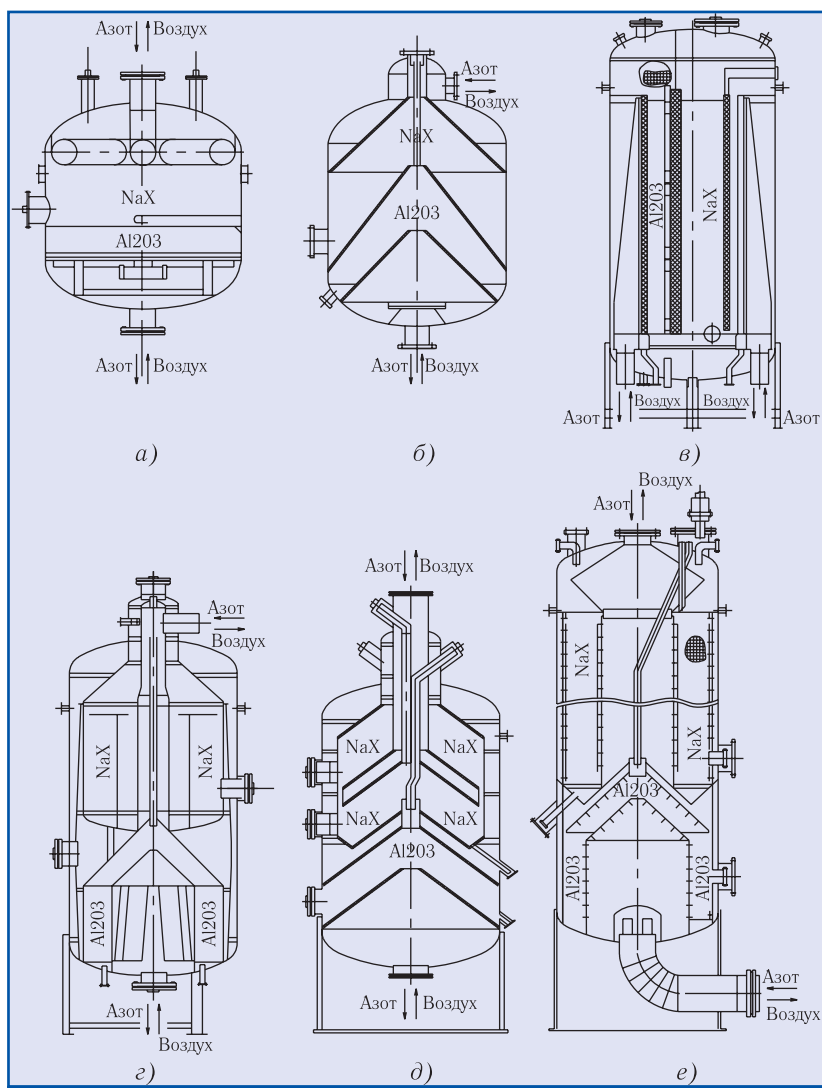


Рис. 1. Блок-схема проектного расчёта блока комплексной очистки





**Рис. 2.** Двухслойные адсорберы, испытанные при отработке их конструкций для ВРУ большой производительности: а и б — адсорберы с осевым током газов на производительность до 30 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; в — адсорбер с поперечным током газов (экспериментальный) — до 60 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; г — адсорбер с радиальным током газов (экспериментальный) — до 60 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; д — адсорбер с радиально-осевым током газов — на 60 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; е — адсорбер с радиальным током газов — от 80 до 200 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$

на работу адсорбера мелкомасштабной (пристенной) гидродинамической неоднородности.

Адсорбер, изображённый на рис. 2,б, — это также аппарат с осевым током газов, но с конусными решётками, дающими возможность производить досыпку адсорбентов в процессе работы.

Два типа рассмотренных аппаратов используются в БКО производительностью до 30 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  очищаемого воздуха. При большей производительности, когда проходные сечения аппаратов должны быть увеличены, а длина адсорбционного слоя остаётся небольшой, были испытаны вертикальные аппараты с радиальным и поперечным током газов. Конструктивные схемы экспериментальных аппаратов этого типа приведены на рисунках 2,в и 2,г. В аппарате, соответствующем рис. 2,в, плоские слои оксида алюминия и цеолита располагаются друг за другом, а потоки очищаемого и регенерирующего газов направлены по

хордам цилиндрического поперечного сечения аппарата. Производительности аппаратов по очищаемому воздуху такой конструкции могут быть любыми. Они будут отличаться только высотой. Но наиболее рациональный диапазон — это от 30 до 60 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Другой экспериментальный аппарат — это адсорбер с двухслойной адсорбционной насадкой и радиальным током газов. Слои оксида алюминия и цеолита разделены, что позволяет уменьшить количество оксида алюминия, используя разницу в допустимых скоростях для каждого сорбента. Частично результаты испытаний рассмотренных экспериментальных аппаратов представлены в работе [5].

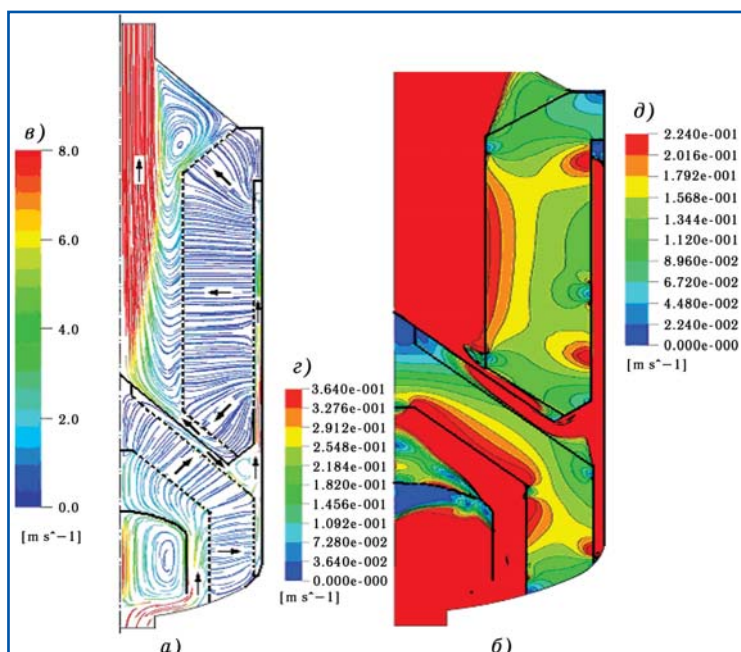
Оба из рассмотренных экспериментальных аппаратов для выравнивания поля скоростей на входе и выходе из адсорбционных слоёв имеют каналы постоянной скорости.

Отличительной особенностью аппарата типа 2,д (см. рис. 2) является то, что потоки газов, проходя слои, движутся под углом к оси аппарата, а конусные ограничивающие решётки, имеющие большее сечение по сравнению с поперечным сечением аппарата, позволяют уменьшить его диаметр. Слои оксида алюминия и цеолита разделены, более того, слой цеолита состоит из двух частей с практически равновеликим проходным сечением. Поток очищаемого газа, пройдя слой оксида, разделяется на две части, которые поступают на слой цеолита в направлении навстречу друг другу. После слоя цеолита потоки вновь соединяются и выводятся из аппарата. Из-за указанных конструктивных

особенностей производительность этого аппарата по очищаемому воздуху ограничивается 60 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

При разработке конструкции адсорбционного аппарата большой производительности с минимальным расходом сорбентов и удобного для транспортирования был предложен адсорбер, приведённый на рис. 2,е. Адсорбер представляет собой аппарат с радиальным током газов и отдельными адсорбционными слоями. Сечение ограничивающих решёток максимально увеличено. Так, в слое оксида алюминия перфорированы не только цилиндрические решётки, но и конусные. То же самое сделано и в слое цеолита. Такую конструкцию используют при создании аппаратов диаметром от 2400 до 3600 мм с производительностью до 220 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Реализации этой конструкции в металле предшествовал тщательный её расчётный анализ. Были проведены расчёты нестационарных процессов тепло- и

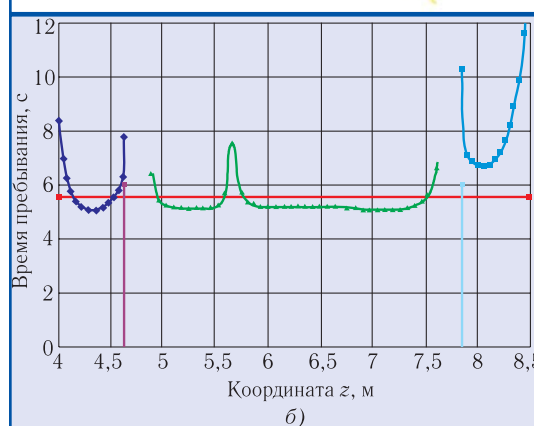
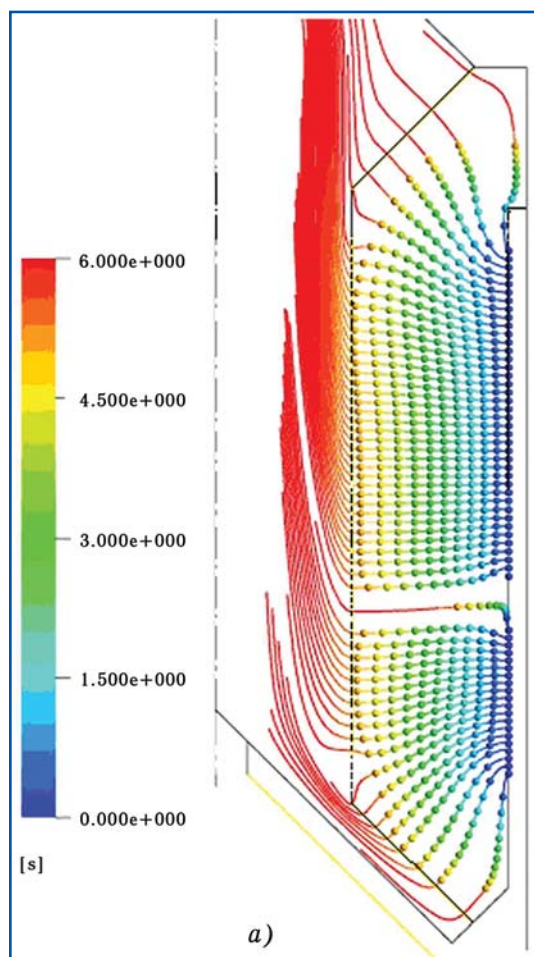


**Рис. 3.** Линии тока и поле скоростей в адсорбере: а — линии тока воздуха в режиме адсорбции; б — поле скоростей в адсорбционных слоях в режиме адсорбции; в — шкала скоростей для диаграммы линий тока; г — шкала скоростей для слоя оксида алюминия (допустимая скорость — 0,364 м/с); д — шкала скоростей для слоя цеолита (допустимая скорость — 0,224 м/с)

массообмена, аэродинамики в этих аппаратах; определена степень их влияния на эффективность адсорбера. Описание этих процессов выполнено с использованием методики, разработанной в работе [6]. Расчёты позволяли проследить во времени и по сечениям адсорбционных слоёв значения отдельных параметров процесса комплексной очистки: накопление влаги в адсорбционном слое, характер выноса влаги в процессе регенерации и характер изменения температуры газа на выходе из адсорбера при нагреве и охлаждении.

Аэродинамические параметры рассчитывались с помощью программного комплекса ANSYS ICEM CFD. Комплекс обеспечивает расчёты динамики течения газов в произвольных трёхмерных областях. Течение описывается дифференциальными уравнениями Навье-Стокса, которые решаются с помощью конечных объёмов. Дифференциальные уравнения интегрируются по каждому объёму. В результате создаётся система алгебраических уравнений. Решение системы, состоящей из десятков и сотен тысяч уравнений, позволяет получить значения параметров потока в узловых точках, а затем на основе интерполирования — в любой точке исследуемой области. Примеры расчётов аэродинамики адсорбера представлены на рисунках 3 и 4.

Влияние процессов аэродинамики в адсорбере на эффективность его работы оценивается путём сопоставления истинного времени пребывания потока в слое с расчётным, определённым из условия равномерного распределения потока по всему рабочему се-



**Рис. 4.** Время пребывания воздуха в слое цеолита: а — линии тока воздуха в цеолите с отметками времени пребывания (режим адсорбции; отметки времени пребывания в NaX — через 0,5 с); б — распределение времени пребывания воздуха в цеолите в зависимости от координаты z точки выхода

чению. Такое сопоставление представлено на рис. 4. На рис. 4,б красной горизонтальной линией показана величина расчётного времени пребывания при равномерном распределении потока по сечению. Сопоставление её со временем пребывания, определённым из аэродинамического расчёта, показывает, что реальное время пребывания в некоторых зонах сечения меньше расчётного. Это свидетельствует о том, что в этих зонах проскок  $\text{CO}_2$  произойдёт раньше. Данное

обстоятельство учитывается при расчёте режима работы БКО.

#### 4. СХЕМЫ БКО И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ВРУ

Комплексная очистка воздуха в ВРУ осуществляется в двух попеременно работающих адсорберах. В то время как один из адсорберов работает в режиме очистки, в другом проводится регенерация адсорбента, т.е. восстановление его адсорбционных свойств. В режиме очистки воздуха (стадия адсорбции) время работы адсорбера определяется по времени появления за адсорбером первой из примесей, представляющей опасность для работы установки, разделения. Такой примесью при комплексной очистке воздуха является диоксид углерода. Все остальные примеси появляются за адсорбционным слоем значительно позже. Попеременная работа адсорберов организуется автоматически с помощью специальных клапанов и программно-временного устройства. Для контроля за ходом процесса очистки адсорберы снабжаются манометрами, термометрами и прибором для контроля качества очистки воздуха от  $\text{CO}_2$ . Схемы узла адсорберов практически одинаковы и не зависят от производительности БКО по очищаемому воздуху.

Отличаются блоки очистки, в основном, узлом подогрева регенерирующего газа. Здесь возможны три варианта его нагрева: с помощью только электронагревателя; с использованием электронагревателя и накопителя тепла; паром. В БКО нашего предприятия нагрев газа только периодически включаемым электронагревателем применяется в ВРУ производительностью до 40 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . При большей производительности, если необходимо осуществить нагрев регенерирующего газа только электронагревателями, используются накопители тепла. В этом случае на стадии охлаждения адсорбера тепло, получаемое в постоянно работающем нагревателе, частью регенерирующего газа переносится в накопитель тепла. На стадии нагрева адсорбера это тепло передаётся потоку регенерирующего газа от теплоаккумулирующей насадки накопителя тепла. Такое техническое решение позволяет обеспечить работу электронагревателей в режиме постоянного включения и снизить их мощность, по

сравнению с периодически работающими нагревателями, почти в три раза. Для нагрева регенерирующего газа с помощью пара используются специальные теплообменники. Как правило, нагрев газа в них производится за счёт теплоты конденсации пара. Поэтому температура регенерации в этих случаях определяется параметрами пара, в основном его температурой конденсации.

Подробный расчётно-теоретический анализ процессов и тщательное экспериментальное совершенствование конструкций способствовали сравнительно быстрому освоению нашим предприятием выпуска установок с БКО, отвечающих мировому техническому уровню. Так, начиная с 2000 г., разработано 48 проектов установок с современными блоками комплексной очистки производительностью по очищаемому воздуху от 2 до 205 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . В настоящее время 23 проекта реализованы, и ВРУ с БКО успешно эксплуатируются. Характеристики установок с количеством перерабатываемого воздуха более 40 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  представлены в табл. 1.

Давая общую характеристику работы БКО, можно утверждать, что этот узел в полной мере выполняет свою основную функцию, т.е. обеспечивает очистку воздуха перед его низкотемпературным разделением до уровня, необходимого для непрерывной работы установки в течение всей рабочей смены. Постоянный анализ очищенного воздуха хроматографическим методом показывает, что содержание диоксида угле-

**Таблица 1.** Характеристики ВРУ с современными блоками комплексной очистки

Воздухоразделительная установка	Кол-во перерабатываемого воздуха	Тип нагрева регенер. газа	Страна	Город	Год ввода в эксплуатацию	
АК-15П МЗ	40000	эл. нагрев	Россия	Ст. Оскол	2006	
КдААр-9/3	45500			Полевской	2009	
КдАдАрж-9/3	47500			Комсом.-на-Амуре		
АКТ-16-2М	47000	пар		Россия	Великий Новгород	2005
КТ-12,5	61000				Ревда	
КААр-16/15	83000				Нижегород	
КдАд-15/12	80000	накопитель тепла	Украина	Новокузнецк	2006	
КААр-15-7М2	80000	пар		Россия		Донецк
КТА-16/18	81000					Северодонецк
КААр-40/20	105000		Тольятти		2009	
Ктд-24	118000		Ревда		2008	
КтКА-35/20	170000		Магнитогорск		2002	
КААр-30М	176000					
КААр-40/35	180000	Магнитогорск	2008			
КААр-40/35-2	180000					
КААр-40/35-4	180000	накопитель тепла	Украина	Днепропетровск	2007	
КААр-60/35	183000	пар	Россия	Череповец	2004	
КААр-30М1	195000			Кривой Рог		
КТА-40/30-1	197000	накопитель тепла	Украина	Алчевск	2005	
КТА-40/30	202000	пар	Россия	Норильск	2006	



рода находится на уровне порога чувствительности существующих методов измерений (сотые доли ppm). Это относится и к качеству очистки воздуха от взрывоопасных примесей с учётом ранее оговорённых особенностей адсорбционной очистки. Здесь следует заметить, что каких-либо корректировок расчётных методов и обеспечиваемых показателей работы БКО не потребовалось. Учитывались лишь качество поставляемых сорбентов и реальные параметры очищаемого воздуха.

Вполне естественно, что внедрение новой технологии очистки и новых конструктивных решений не могло пройти без определённого периода доводок, поскольку предусмотреть и проанализировать все возможные случаи отклонения в работе промышленных объектов довольно сложно. Такие случаи возникали при освоении новых блоков комплексной очистки. В ходе проведения пуско-наладочных работ и последующей эксплуатации БКО проявили себя два недостатка. Первый из них — негерметичность теплообменников нагрева регенерирующего газа паром. Этот недостаток был обнаружен при пусках первых установок в 2002 г. Выполненный анализ показал, что наличие паров воды в регенерирующем газе серьёзным образом влияет на эффективность работы БКО. Это сказывается, в первую очередь, на качестве очистки воздуха от  $\text{CO}_2$ . Так, при наличии паров воды на уровне точки росы более  $-70^\circ\text{C}$  получить содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе менее 0,2-0,5 ppm не представляется возможным. Такое качество очистки не обеспечивало работу установки без забивки теплообменников в течение всей рабочей компании. Кроме того, наличие влаги в регенерирующем газе снижало адсорбционную ёмкость цеолита. Характер этого влияния можно проследить по данным табл. 2.

**Таблица 2.** Изменение времени адсорбции в зависимости от влажности регенерирующего газа

Содержание паров $\text{H}_2\text{O}$ , ppm	Точка росы, $^\circ\text{C}$	Время работы, ч	Доля времени от расчётного
0,01	-100	2,77	0,97
0,05	-93	2,5	0,87
0,1	-89	2,37	0,828
0,5	-80	2,02	0,706
1,0	-76	1,85	0,64
2,6	-70	1,59	0,55
5,0	-65	1,4	0,49
10	-60	1,18	0,41

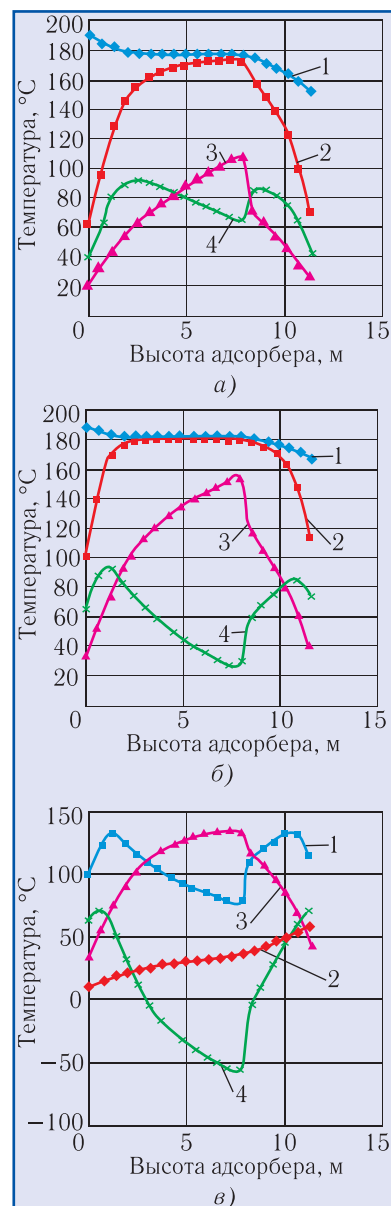
**Примечание:** Исходное расчётное время адсорбции — 2,86 ч. Температура регенерации —  $150^\circ\text{C}$ .

Приведённые в таблице показатели свидетельствуют о том, что даже очень малое количество воды в регенерирующем газе существенно сокращает время работы адсорбера. Например, при точке росы регенерирующего газа —  $70^\circ\text{C}$  время защитного действия адсорбера сокращается в 2 раза, т.е. БКО становится полностью неработоспособным. С учётом этого обстоятельства технология изготовления паровых теп-

лообменников была доработана, а на потоке регенерирующего газа, в случае нагрева его паром, установлены более чувствительные приборы измерения влажности.

Вторым недостатком, выявленным в процессе уже эксплуатации установок с новыми БКО, оснащёнными адсорберами с радиальным током газов, является неудачная конструкция компенсатора температурных деформаций между корпусом адсорбера и внешней перфорированной обечайкой, ограничивающей слой  $\text{NaX}$ . Конструкция этого узла была такова, что со временем цеолит через компенсатор попадал в кольцевое пространство между корпусом адсорбера и внешней перфорированной обечайкой. Это приводило к выходу из строя адсорбера и БКО, в целом, и к остановке ВРУ. Для разработки более надёжной конструкции этого узла были выполнены расчёты температурных изменений элементов адсорбера (рис. 5) и их температурных деформаций (рис. 6).

На рис. 7 приведена новая конструкция компенсатора температурных деформаций со специальным уплотнением и результаты расчёта аэродинамики регенерирующего потока для случая, если уплотнение будет негерметичным. Эти расчёты показали, что с введением ряда конструктивных элементов в компенсатор температурных деформаций



**Рис. 5.** Температурные изменения в адсорбере для 180 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  очищаемого воздуха после 48 мин (а), 76 мин (б) и 90 мин (в) от начала процесса регенерации. Диаграммы распределения по высоте адсорбера температур: 1 — газа; 2 — перфорированной обечайки; 3 — корпуса адсорбера; 4 — разности температур между корпусом адсорбера и внешней перфорированной обечайкой



скорости газа в нём будут таковы, что вынос сорбента в кольцевое пространство исключается. Эта конструкция компенсатора использовалась во всех выпущенных нами блоках.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние расчётно-теоретические и экспериментальные исследования, а также опытно-промышленные испытания, выполняемые на нашем предприятии, позволили создать надёжную базу для качественного проектирования блоков комплексной очистки и анализа их работы на промышленных объектах. Всё это обеспечило достаточно быстрое внедрение новой технологии очистки воздуха, отвечающей современному мировому уровню, в ВРУ нового поколения.

Отличительными особенностями БКО нового типа являются: широкое использование двухслойных адсорбционных насадок (оксид алюминия — для осушки воздуха и цеолит — для очистки от  $\text{CO}_2$ , углеводородов и других примесей); применение транспортабельных адсорбционных аппаратов с радиальным током газов и короткими адсорбционными слоями; существенное уменьшение количества используемых адсорбентов за счёт перехода на малое время цикла переключения; минимизация затрат энергии на регенерацию путём реализации режима термоимпульса и относительно низких температур нагрева адсорбционных слоёв; обеспечение работы БКО в энергосберегающих режимах, учитывающих строгую однозначную взаимосвязь параметров очищаемого и регенерирующего газов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блазнин Ю.П., Кусый Г.В. Исследование процессов в блоках комплексной очистки воздуха// Сб. «Криогенная техника». — Балашиха Моск. обл.: ОАО «Криогенмаш», 1999. — С. 84-92.
2. Блазнин Ю.П., Максимова Л.В., Файнштейн В.И. Оценка адсорбционных свойств цеолитов, предназначенных для блоков комплексной очистки// Технические газы. — 2004. — № 4. — С. 37-39.
3. Адсорбционная очистка воздуха синтетическими цеолитами/ Е.В. Вагин, Н.Ф. Катина, В.Г. Сагайдак, В.А. Самойлова// Труды ВНИИкриогенмаш. — 1971. — Вып. 13. — С. 231-246.
4. Naumov V.A., Vorotyntsev V.B., Kusiya G.V. Non-isothermal regeneration of molecular sieve adsorbents in a

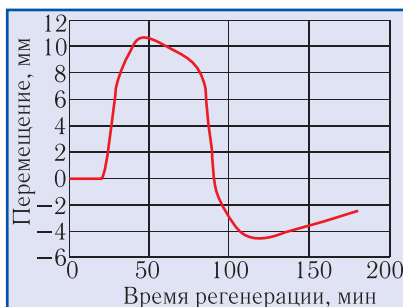


Рис. 6. Диаграмма относительного продольного перемещения торцов корпуса адсорбера и перфорированной обечайки при регенерации адсорбента

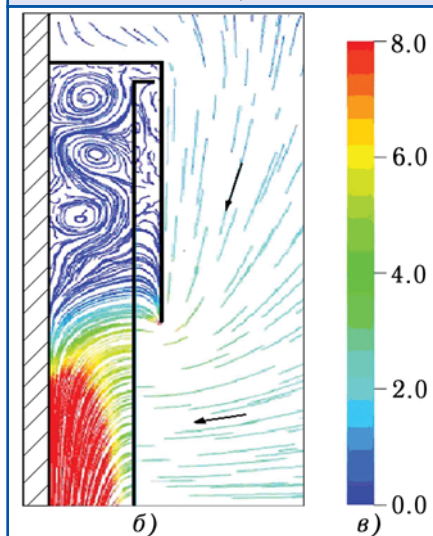
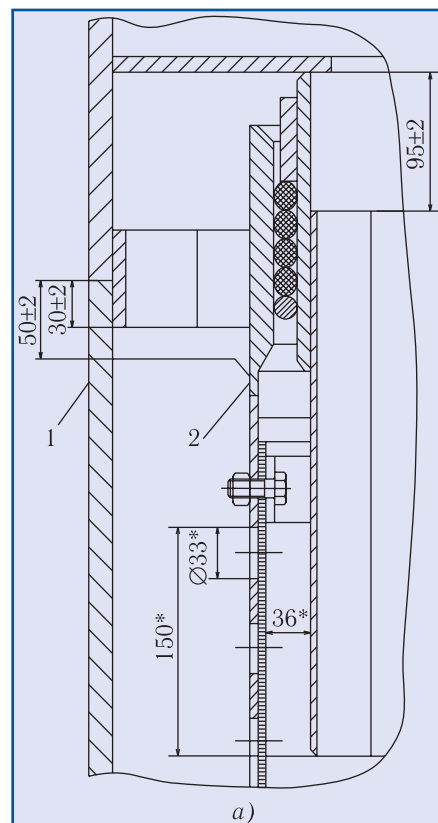


Рис. 7. Компенсатор температурных деформаций: а — конструкция компенсатора; б — линии тока газа в районе компенсатора на стадии регенерации; в — шкала скоростей к диаграмме линий тока; 1 — корпус адсорбера; 2 — внешняя перфорированная обечайка, ограничивающая слой NaX

cyclic process of air purification from moisture and carbon dioxide// Gas Separation & Purification. — 1994. — Vol. 8. — № 3. — P. 167-174.

5. Слободов Е.Б., Блазнин Ю.П. Влияние пристенных неоднородностей на эффективность глубокой адсорбционной очистки газов// Теор. основы хим. технологии — 1996. — Т.30. — № 2. — С. 134-139.

6. Наумов В.А. Исследование процессов тепло- и массообмена при адсорбционной очистке воздуха в воздухоразделительных установках низкого давления// Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Балашиха: ОАО «Криогенмаш», 1991. — 18 с.