

УДК 66.02

ПРИНЦИПЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНЦЕПЦИИ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. В. П. Мешалкин^{a, d, e *}, Т. В. Гусева^b, А. С. Малявин^b,
И. О. Тихонова^a, А. В. Малков^a, Ч. Бхимани^c

^a Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

^b НИИ “Центр экологической промышленной политики”

^c Climate Change and Sustainability Professional, Ahmedabad (India)

^d Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

^e Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

* e-mail: vmeshalkin@muctr.ru

Поступила в редакцию 03.12.2023 г.

После доработки 28.01.2024 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Статья посвящена анализу роли химической технологии в развитии концепции наилучших доступных технологий и особенностей ее практического применения при разработке и актуализации информационно-технических справочников, а также их использования для целей эколого-технологического нормирования промышленных предприятий. Кратко описана эволюция концепции наилучших доступных технологий, и изложены ее основные принципы, в обосновании которых принимали участие ведущие отечественные ученые. Показано, что наилучшие доступные технологии направлены на повышение ресурсной (в том числе энергетической) эффективности производства и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Представлен анализ основных тенденций развития технологий производства минеральных удобрений. Приведены технологические показатели эмиссий, показатели ресурсной эффективности и углеродоемкости для наилучших доступных и перспективных технологий. Подчеркнуто, что химические технологии играют ключевую роль в сокращении негативного воздействия на окружающую среду в различных отраслях промышленности; проанализированы проекты очистки отходящих газов от оксидов серы, разработанные для металлургических предприятий. Представлен взгляд международного коллектива авторов на перспективы совершенствования концепции наилучших доступных технологий и расширения практики ее применения в Российской Федерации и за рубежом.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, информационно-технические справочники, химическая технология, химическая промышленность, производство минеральных удобрений, ресурсная эффективность, негативное воздействие на окружающую среду

DOI: 10.31857/S0040357124010029, **EDN:** ZGCPW

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2024 г. исполняется 120 лет со дня рождения выдающегося российского химика-технолога, специалиста в области теоретических основ химической технологии П. Г. Романкова. Авторы статьи учились по книгам П. Г. Романкова, читали его монографии и с уверенностью могут утверждать, что дисциплины “Процессы и аппараты химической технологии” и “Общая химическая технология” формируют мировоззрение инженеров [1, 2].

В 1970–1980-е гг. в Московском химико-технологическом институте им. Д. И. Менделее-

ва, где в 1930-е гг. начинал свою педагогическую деятельность П. Г. Романков, были открыты кафедры технологии рекуперации вторичных материалов промышленности (основатель — проф. А. И. Родионов) и промышленной экологии (основатель — чл.-корр. АН СССР Г. А. Ягодин) [3]. Именно в это время химики-технологи формировали принципы комплексной переработки сырья, создания малоотходных технологий, водооборотных циклов и подходы к разработке эффективной средозащитной техники. Химическая технология стала краеугольным камнем построения концепции наилучших доступных технологий (НДТ), на основе которой осуществляется эколого-техно-

логическое нормирование в десятках стран мира. С 2014 г. требование внедрения НДТ распространяется на крупные российские предприятия более 40 отраслей промышленности [4, 5].

2. ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Химическая технология – наука об экономически, экологически целесообразных методах и средствах химической переработки природных и вторичных ресурсов в продукты потребления и промежуточные продукты [6]. Подчеркнем, что химическая технология изучает процессы производства во многих отраслях промышленности: химической, нефтехимической, металлургической, целлюлозно-бумажной, текстильной, легкой, пищевой и других. Оптимизация процессов преобразования ресурсов, повышение эффективности использования сырья, энергии, воды – таковы приоритетные направления исследований химиков-технологов. Результаты работ специалистов Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета, где в 1940-е гг. П. Г. Романков организовал кафедру процессов и аппаратов химической технологии), Ивановского государственного химико-технологического университета и других высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов были положены в основу разработки информационно-технических справочников (ИТС) по НДТ для химической промышленности [7, 8].

НДТ представляют собой совокупность экономически целесообразных технологических, технических и организационных решений, практическое применение которых позволяет предприятиям добиваться высокой ресурсной эффективности и сокращения негативного воздействия на окружающую среду (в том числе снижения выбросов парниковых газов) [7, 9, 10]. Для различных видов экономической деятельности (промышленности, энергетики, сельского, жилищно-коммунального хозяйства, сферы обращения с отходами) разрабатываются отраслевые (так называемые “вертикальные”) и межотраслевые (“горизонтальные”) ИТС. Это международная практика [11], хотя некоторые ИТС (для добычи и обогащения металлических руд, добычи угля, очистки коммунальных сточных вод и др.) уникальны и разработаны только в России. К настоящему времени в Российской Федерации

подготовлены, утверждены, введены в действие и последовательно актуализируются 54 информационно-технических справочника [12].

Особенность российского подхода состоит в том, что ИТС НДТ представляют собой документы национальной системы по стандартизации; их разработку и актуализацию координирует специально созданное в России Бюро НДТ. Такое решение было принято в 2014 г. с учетом результатов международных и национальных проектов по разработке пилотных справочников. В 2003–2012 гг. эксперты выполнили отраслевой сравнительный анализ ресурсной и экологической эффективности российских предприятий по производству аммиака, тарного стекла, керамического, стали, а также объектов, обеспечивающих выработку энергии на теплоэлектростанциях и очистку коммунальных сточных вод. В эти же годы был разработан ряд “пробных” справочников и национальных стандартов по НДТ. В качестве альтернативного рассматривался вариант подготовки информационно-технических справочников силами специалистов институтов, подведомственных Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Но в определении НДТ и создании ИТС во всех странах ключевую роль играют технологи; именно они оценивают технологические процессы, материальные и энергетические балансы, особенности формирования водооборотных циклов, обращения отходами и другие характеристики, необходимые для определения (идентификации) наилучших доступных технологий [11, 13, 14].

Из действующих сегодня российских ИТС НДТ непосредственное отношение к химической промышленности имеют более 10 справочников и прежде всего следующие:

- ИТС 2–2022 “Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот” [15];
- ИТС 18–2019 “Производство основных органических химических веществ” [16];
- ИТС 19–2020 “Производство твердых и других неорганических химических веществ” [17].

Рассмотрим особенности взаимосвязи принципов химической технологии и наилучших доступных технологий на практических примерах.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие технологий производства минеральных удобрений. Несмотря на многообразие описанных технологий получения различных химических веществ (продуктов основного органического и неорганического синтезов, тонкого органического и неорганического синтеза, газо- и нефтехимии, полимеров и др.) единым подходом, направлен-

ным на повышение ресурсной, энергетической и экологической эффективности производства, является использование фундаментальных принципов химической технологии.

Проанализируем развитие отрасли производства минеральных удобрений, тесно связанной с сельским хозяйством, потребности которого и служат основной движущей силой развития технологий.

На начальном этапе в сельском хозяйстве использовалось природное или техногенное сырье без какой-либо химической обработки: фосфоритная мука, чилийская и индийская селитра, страссфуртские съёмочные соли, калимагнезия, Томасов шлак, древесный уголь и др. Возрастание потребности человечества в удобрениях привело к применению химических методов переработки фосфатного сырья, созданию способов получения аммиака, азотных удобрений, к переработке калийных руд.

Доступность сырьевых компонентов (фосфатное сырье и серная кислота) обусловила промышленное внедрение технологии получения одного из первых синтетических удобрений – суперфосфата, начался второй этап развития технологии производства минеральных удобрений. Открытие и внедрение в промышленное производство метода связывания атмосферного азота с получением аммиака, прогресс в производстве азотных и калийных удобрений сделали удобрения доступными для широкого применения в сельском хозяйстве [18].

Дальнейшее развитие было направлено на получение комплексных удобрений, расширение методов кислотной переработки (фосфорнокислотное и азотнокислотное разложение фосфатного сырья), увеличение содержания в продукции биогенных веществ. На смену простому суперфосфату пришел двойной суперфосфат, содержащий большее количество усвояемого фосфора. Развитие технологий фосфорной и азотной кислот, а также увеличение мощностей производства аммиака привели к созданию производств фосфатов аммония, NP- и NPK-удобрений на основе азотнокислотного разложения фосфатного сырья.

В 2022 г. в десятку лидеров производства минеральных удобрений входили Соединенные Штаты Америки, Республика Индия и Российская Федерация (табл. 1); в большинстве стран экологотехнологическое нормирование предприятий осуществляется на основе концепции НДТ.

Этапы развития технологий производства минеральных удобрений, характерные для передовых стран мира, представлены на рис. 1.

Как следует из рассмотрения рис. 1, в последнее время в отрасли производства минеральных

удобрений все более пристальное внимание стало уделяться комплексному использованию сырья, вовлечению в переработку вторичных материальных и энергетических ресурсов, извлечению полезных компонентов, присутствующих в сырье в незначительных количествах (таких как редкоземельные элементы или соединения фтора). Современный этап можно назвать этапом повышения ресурсной и экологической эффективности на всех этапах жизненного цикла минеральных удобрений [20].

Таблица 1. Производство минеральных удобрений в 2022 г. [19]

Государство	Производство минеральных удобрений, тыс. т
США	54.4
Индия	52.6
Россия	51.9
Канада	36.5
Индонезия	11.7
Польша	10.6
Саудовская Аравия	7.8
Тринидад и Тобаго	7.1
Украина	6.3
Литва	4.2

Жизненный цикл и совершенствование технологий производства и применения минеральных удобрений. В контексте устойчивого развития (что весьма важно для производства минеральных удобрений) эволюцию технологий современные исследователи рассматривают на протяжении жизненного цикла продукции [21].

Движущие силы развития технологий представлены совокупностью различных факторов. В их числе следует отметить демографическую ситуацию (на глобальном, региональном и национальном уровнях), обеспеченность населения продовольствием, изменение климата и вызванную им ускоренную деградацию почв, развитие сельского хозяйства и агротехнологий, а также взаимосвязь технологий производства и применения удобрений [21].

Взаимное влияние внешних и внутренних факторов приводит к необходимости адаптации производств минеральных удобрений, основные инструменты которой, в зависимости от типа воздействия, заключаются в увеличении экономической, ресурсной, энергетической, экологической или социальной эффективности производства на протяжении жизненного цикла удобрений [22].

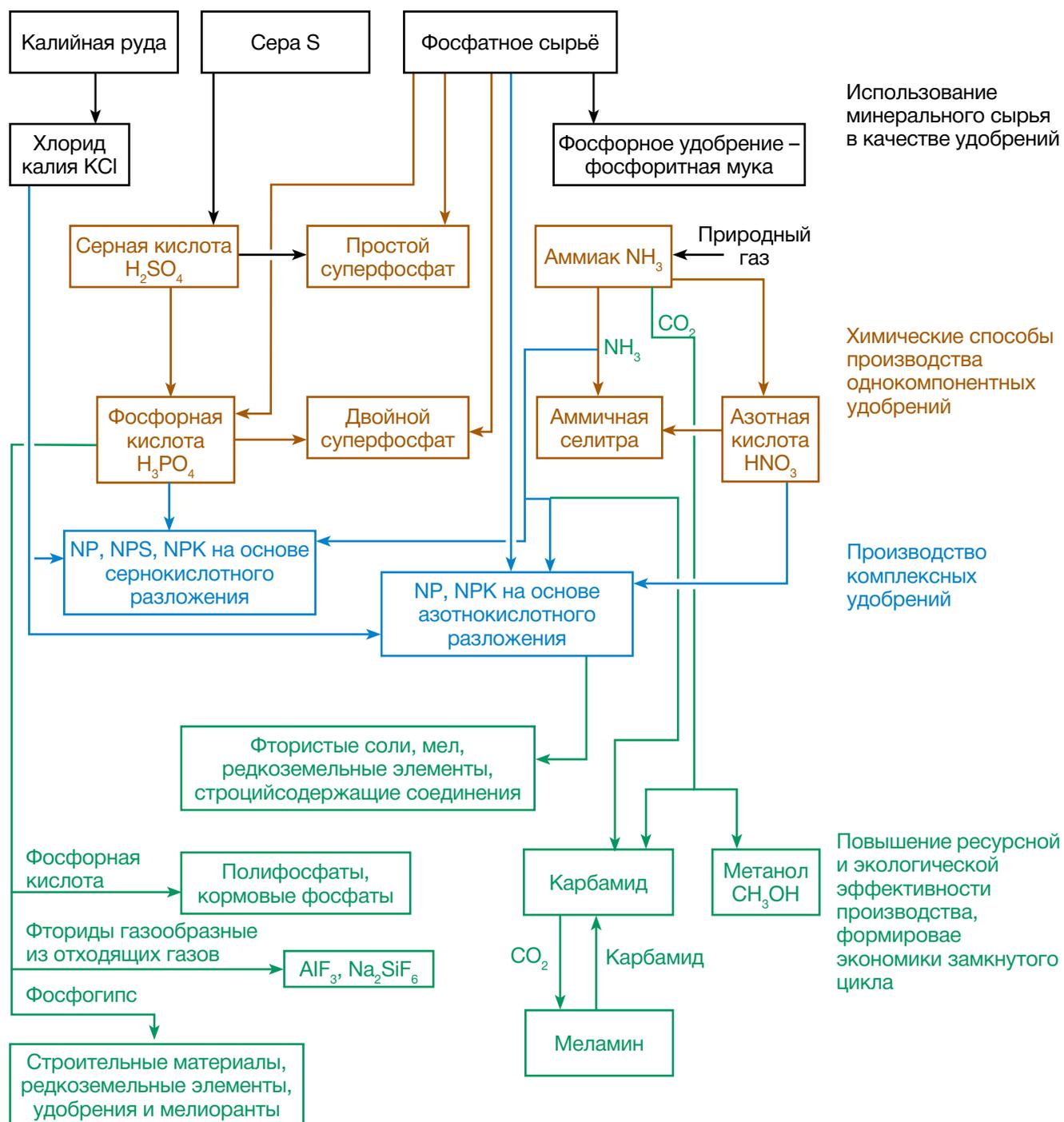


Рис. 1. Этапы развития технологий производства минеральных удобрений и смежных производств.

Анализ литературных источников и справочников по НДТ, разработанных и применяемых в различных странах и регионах, позволяет систематизировать инструменты повышения ресурсной эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду (в том числе выбросов парниковых газов) на протяжении жизненного цикла фосфорных удобрений [15, 18, 23–25]:

- комплексное и полное использование сырья: вовлечение в процессы переработки низкосорт-

ного фосфатного сырья и хвостов обогащения, получение фосфорсодержащих удобрений, фторидов и кремнефторидов, соединений редкоземельных металлов, технических, кормовых и пищевых фосфатов [26];

- разработка удобрений пролонгированного действия с регулируемой растворимостью питательных биогенных веществ; комплексных удобрений с микро- и мезоэлементами, стимуляторами роста растений, микробиологических и бактери-

альных удобрений и др. [27]; развитие агрохимических технологий, обеспечивающих повышение эффективности применения удобрений, совершенствование способов внесения, подбор рецептуры и индивидуальных доз внесения [28, 29];

- использование вторичных энергетических ресурсов: тепла горения серы, окисления SO_2 в SO_3 , тепла абсорбции в производстве серной кислоты, тепла химических реакций нейтрализации фосфорной, азотной и серной кислот [30];

- использование вторичных материальных ресурсов: фосфогипса, шлама со станции нейтрализации кислых стоков, конверсионного мела [31];

- оптимизация технологического процесса, применение современного энергоэффективного оборудования и средозащитной техники [32].

В табл. 2 приведены примеры улучшения технологических показателей эмиссий, показателей ресурсной эффективности и углеродоемкости производства минеральных удобрений.

Представленные в табл. 2 примеры реализованных лидерами отрасли решений свидетельствуют о том, что НДТ вовсе не являются недостижимыми, напротив, практическое применение ключевых принципов химической технологии позволяет достигать лучших показателей ресурсной (в том числе энергетической) и экологической эффективности.

Применение химической технологии для сокращения негативного воздействия на окружающую среду в других отраслях промышленности. Химико-технологические процессы получения определен-

ных продуктов в целом протекают одинаково, вне зависимости от того, являются они “основными” или “вспомогательными”, хотя некоторые (несущественные) различия могут быть обусловлены именно отраслевой спецификой.

Рассмотрим пример производства одного из многотоннажных химических продуктов – серной кислоты, без которой невозможно существование отрасли минеральных удобрений. Основным информационно-техническим справочником, в котором описано данное производство, является ИТС 2–2022 [15], однако в данном справочнике прямо указано, что он “не распространяется на производство серной кислоты из отходящих газов цветной металлургии и нефтехимической промышленности”.

При этом в производстве цветных металлов из сульфидных руд, безусловно, образуется в значительных количествах диоксид серы, выбросы которого в атмосферный воздух должны быть снижены путем улавливания и производства серной кислоты, элементарной серы или других подобных продуктов. Поэтому производство серной кислоты (которое можно охарактеризовать как “вспомогательное”) упоминается в ИТС 3–2019 “Производство меди” [33] и ИТС 12–2015 “Производство никеля и кобальта” [34] (рис. 2).

Однако в указанных справочниках (ИТС 3–2019 [33], ИТС 12–2015 [34]) не рассматриваются вопросы технологии производства серной кислоты, поскольку оно является вторичным по отношению к производству цветных металлов. К сожалению

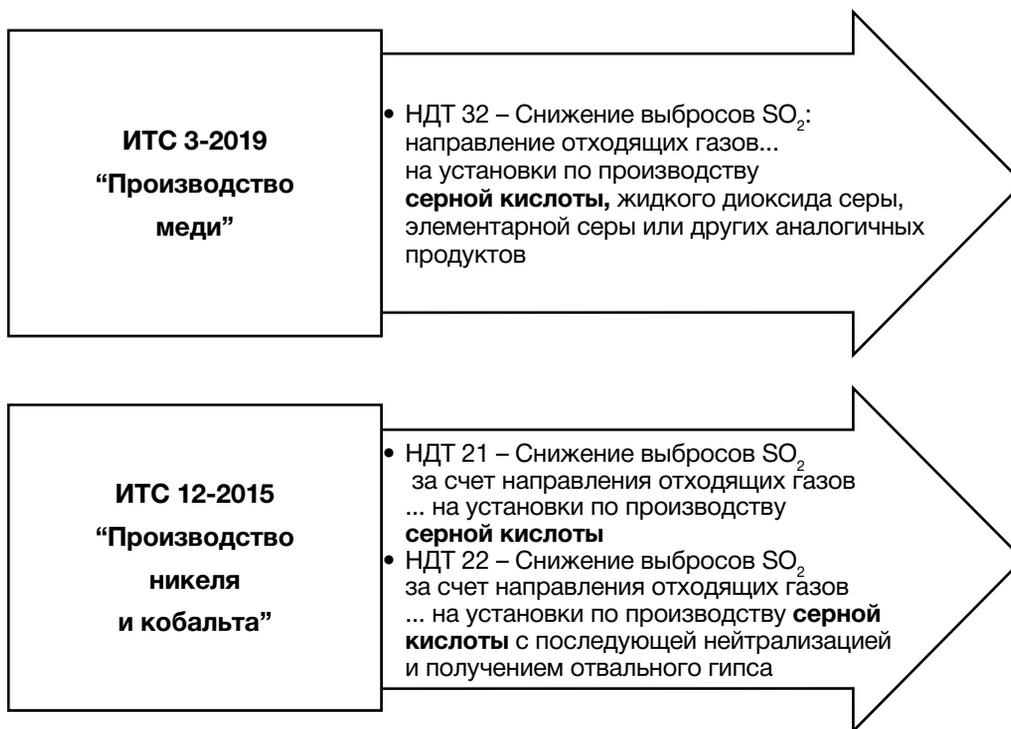


Рис. 2. Перечень наилучших доступных технологий снижения выбросов диоксида серы с производством серной кислоты.

Таблица 2. Примеры развития технологий производства минеральных удобрений

Характеристики	Показатели НДТ	Показатели, достигнутые лидрами отрасли	Реализованные технологические и технические решения, приводящие к достижению лучшего результата
Производство серной кислоты			
Энергетическая эффективность и углеродоемкость			
Выработка энергетического пара, ГДж/т H ₂ SO ₄	2.3–4.06	4.48–5.74	<ul style="list-style-type: none"> Внедрение системы утилизации тепла абсорбции позволяет снизить зависимость предприятия от тепловой энергии, вырабатываемой на газовой теплоэлектростанции. Удельные выбросы по охвату 2 снижаются с 0.78 до 0.67 т CO₂-экв./т H₂SO₄
Выбросы парниковых газов, т CO ₂ -экв./т H ₂ SO ₄	Показатель не установлен	Достижимо снижение на 0.11 т CO ₂ -экв./т H ₂ SO ₄	
Производство фосфорной кислоты			
Ресурсная (в том числе энергетическая) эффективность			
Расход пара на 1 т упаренной кислоты), МДж/т P ₂ O ₅	2975–6908 для дигидратного процесса	2805–3038 для полугидратного процесса	<ul style="list-style-type: none"> Внедрение более производительного полугидратного процесса производства фосфорной кислоты
Водопотребление, м ³ /т P ₂ O ₅	1.2–4.6	1.2–2.7	<ul style="list-style-type: none"> Организация сбора воды после волокольевого вакуумного насоса и возврат ее в водооборот
Производство фосфатов аммония			
Энергетическая эффективность			
Расход природного газа, м ³ /т аммофоса	8.32–56.76	8.4	<ul style="list-style-type: none"> Использование концентрированной фосфорной кислоты. Использование тепла отходящих газов. Температурный контроль стадий нейтрализации и сушки
Экологическая эффективность			
Выбросы аммиака, кг/т аммофоса	1.58	0.60	<ul style="list-style-type: none"> Контроль pH аммонизированных пульпы и абсорбционной жидкости.
Выбросы фторидов газообразных (в пересчете на фтор), кг/т аммофоса	0.17	0.05	<ul style="list-style-type: none"> Использование концентрированной фосфорной кислоты. Использование тепла отходящих газов. Температурный контроль стадий нейтрализации и сушки. Внедрение многоступенчатой абсорбции с санитарными ступенями очистки
Комплексное использование сырья			
Извлекаемые полезные компоненты	Фосфор: фосфор-содержащие удобрения	Фосфор: фосфорсодержащие удобрения, кормовые и технические фосфаты Фтор: фторид алюминия, кремнефторид натрия, кремнефтористоводородная кислота; Серя: сульфат аммония конвенсионный Кальций: карбонат кальция конвенсионный Редкоземельные элементы, стронций	<ul style="list-style-type: none"> Выделение кремнефтористоводородной кислоты в процессе получения фосфорной кислоты. Выделение редкоземельных элементов, стронция в процессе переработки фосфатного сырья. Конверсия фосфогипса

нию, это обстоятельство становится основанием для отказа ряда организаций при проектировании производства серной кислоты из уловленных газов цветной металлургии учитывать технологические решения, указанные в ИТС 2–2022 [15].

На рис. 3 показаны технологические блок-схемы производства серной кислоты:

- на первой блок-схеме учтены современные технологии – добавление пятого слоя в существующие контактные аппараты (НДТ 18 по ИТС 2–2022 [15]) и использование новых типов катализаторов, в том числе и цезий-промотированных (НДТ 17); именно такие технологии проектируются и реализуются в настоящее время в отрасли производства неорганических кислот;

- на второй блок-схеме конверсия диоксида серы проводится в четырехслойном контактном аппарате, используется непромотированный ванадиевый катализатор; такие технологии проектируются для улавливания диоксида серы в отрасли производства цветных металлов [33, 34].

Ограниченное, одностороннее восприятие концепции НДТ и отказ от учета “химических” наилучших доступных технологий приводят к тому, что сегодня в основу проектирования технологий, рассчитанных на многие годы эксплуатации в цветной металлургии, закладываются устаревшие, энергетически и экологически неэффективные решения.

В целом, концепция наилучших доступных технологий направлена именно на расширительное применение ИТС НДТ; нет запрета на учет и применение НДТ, указанных в различных справочниках, как отраслевых, так и межотраслевых. Именно учет возможностей химической технологии и внедрения НДТ, доказавших свою действенность в химической промышленности (в нашем примере – НДТ получения серной кислоты), позволяет предприятиям других отраслей добиваться высокой ресурсной и экологической эффективности производства.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе концепции наилучших доступных технологий, являющейся основой эколого-технологического регулирования во многих странах мира, лежат фундаментальные принципы химической технологии: 1) проектированию должны предшествовать научные исследования и эксперименты; 2) этап проектирования должен включать определение последовательности процессов, условий их проведения, а также разработку и оптимизацию оборудования; 3) при промышленном внедрении технологий, апробированных в лаборатории, необходимо учитывать эффект масштабирования и его влияние на ресурсную, экологическую эффективность процессов и их безопасность; 4) предотвращение потерь вещества и энергии позволяет минимизировать

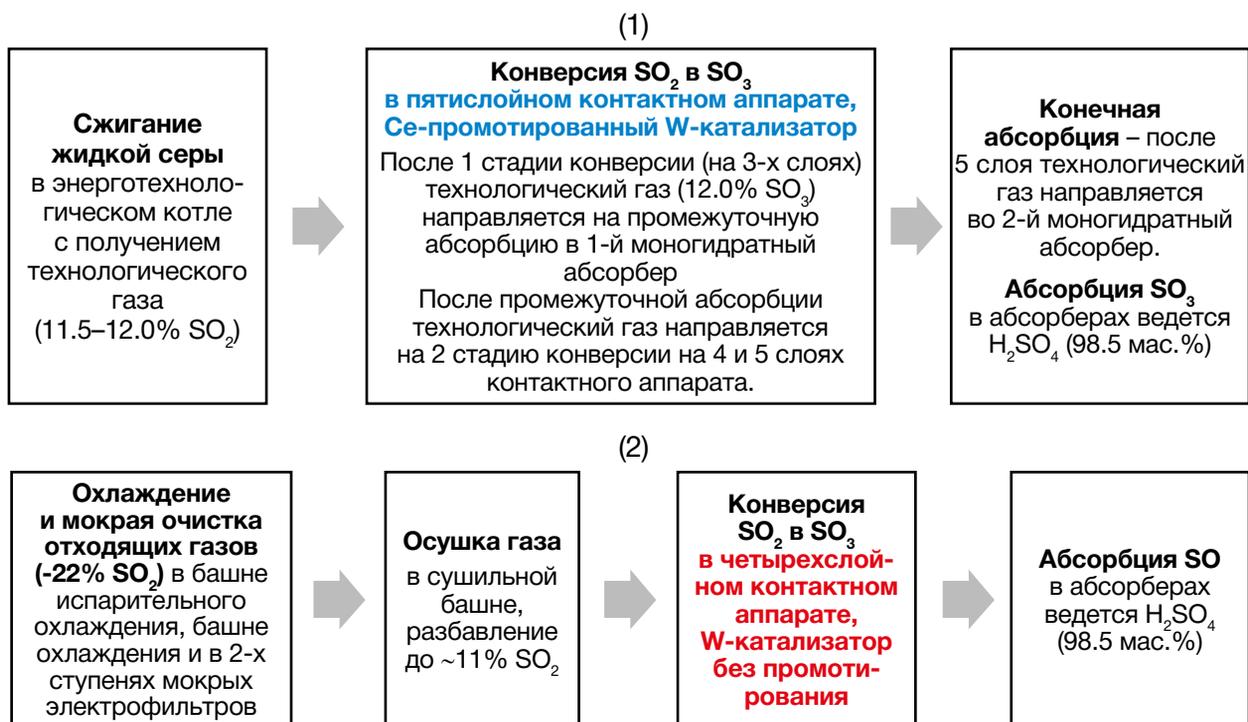


Рис. 3. Технологическая схема производства серной кислоты с двойным контактированием и двойной абсорбцией (ДК-ДА): 1 – в отрасли производства неорганических кислот, 2 – в отрасли производства цветных металлов.

негативное воздействие на окружающую среду; 5) постоянный контроль процессов позволяет оптимизировать условия эксплуатации, увеличить производительность и снизить затраты. Эти принципы были сформулированы в работах П. Г. Романкова, советского химика-технолога, выдающегося специалиста в области теоретических основ химической технологии.

Сегодня наилучшие доступные технологии разработаны для десятков отраслей промышленности; при этом химические технологии применяются в большинстве из них как для получения основных и побочных продуктов, так и для извлечения загрязняющих веществ изходящих газов, сточных вод, а также для переработки отходов. На примере производства и применения минеральных удобрений показано, что на совершенствование концепции НДТ оказывает влияние развитие экологической химии и токсикологии: это проявляется в учете аспектов жизненного цикла продукции при выборе наилучших доступных и перспективных технологий.

Разработка и последовательная актуализация информационно-технических справочников по НДТ призвана стимулировать внедрение новых химических технологий в различных отраслях промышленности для повышения ресурсной и экологической эффективности производства и формирования экономики замкнутого цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1982.
2. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии: системы с дисперсной твердой фазой. Л.: Химия, 1990.
3. Ягодин Г.А., Тарасова Н.П. Будущее промышленности в свете концепции устойчивого развития // Экол. и пром. России. 2001. № 3. С. 23.
4. Бобылев С.Н., Кудрявцева О.В., Скобелев Д.О., Соловьева С.В., Яковлева Е.Ю. НДТ: новая российская технологическая революция. М.: Центр экологической промышленной политики, 2021.
5. Skobelev D. Building the Infrastructure for Transforming Russian Industry towards Better Resource Efficiency and Environmental Performance // Procedia Env. Sci. Eng. & Man. 2021. V. 8. No 2. P. 483.
6. Кулов Н. Н., Кутепов А.М. Химическая технология // Химическая энциклопедия. Москва, Большая российская энциклопедия. 1998. Т. 5. С. 467.
7. Скобелев Д.О. Наилучшие доступные технологии: опыт повышения ресурсной и экологической эффективности производства. М.: АСМС, 2020.
8. Мешалкин В.П., Кулов Н.Н., Гусева Т.В., Тихонова И.О., Бурвикова Ю.Н., Бхимани Ч., Щелчков К.А. Наилучшие доступные технологии и зеленая химическая технология: возможности сближения концепций // Теорет. основы хим. технологии. 2022. Т. 56. № 6. С. 670.
9. Almgren R., Skobelev D. Evolution of Technology and Technology Governance // J. Open Innovation: Technol., Mark., Complexity. 2020. V. 6. No 2. P. 22.
10. Доброхотова М.В., Матушанский А.В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // Экон. уст. развит. 2022. № 2 (50). С. 63.
11. Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 2: Approaches to Establishing Best Available Techniques Around the World, Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD. 2018. URL: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/approaches-to-establishing-best-available-techniques-around-the-world.pdf>
12. Скобелев Д.О. Очередной этап развития системы эколого-технологического регулирования промышленности в России // Экон. уст. развит. 2022. № 1 (49). С. 83.
13. Best Available Techniques for Indian Iron and Steel Sector. Green Rating Project. Centre for Science and Environment, New Delhi, 2012. URL: <https://www.cseindia.org/best-available-techniques-for-indian-iron-and-steel-sector-4950>
14. Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution, Activity 4: Guidance Document on Determining BAT, BAT-Associated Environmental Performance Levels and BAT-Based Permit Conditions. Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD. 2020. URL: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/guidance-document-on-determining-best-available-techniques.pdf>
15. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 2–2022 “Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот”.
16. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 18–2019 “Производство основных органических химических веществ”.
17. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 19–2020 “Производство твердых и других неорганических химических веществ”.
18. Малявин А.С., Миносьянц С.В., Аксенчик К.В., Лапушкин В.М. Производство минеральных удобрений // Энци. технологий 2.0: Химический комплекс. М., СПб.: Реноме. 2022. С. 11.
19. Fertilizer Production by Country. Global Population Review, 2023. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/fertilizer-production-by-country>
20. Локшин Э.П., Тареева О.А., Елизарова И.Р. Сорбционная конверсия — эффективный метод отделения фтора и фосфора при переработке фтор-фосфатных и фосфатных концентратов РЗЭ, получаемых из Хибинского апатитового

- концентрата // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5 (31). С. 85.
21. Левин Б.В., Трухачев В.И., Белоухов С.Л. Зеленый эталон: новая стратегия АПК России. М.: 2022.
 22. Martey E, Kuwornu J.K.M., Adjebeng-Danquah J. estimating the effect of mineral fertilizer use on land productivity, and income: evidence from Ghana // Land Use Policy. 2019. V. 85. P. 463.
 23. Gezertan A.O., Çorbacıoğlu B.D. Best Available Techniques in the fertilizer production industry: a review // Europ. J. of Chemistry. 2016. V. 7 (2). P. 243.
 24. Skowronska M., Filipek T. Life Cycle Assessment of fertilizers: a review // Int. Agrophysics. 2014. V. 28. Is. 1. P. 101.
 25. Малявин А.С., Волосатова А.А., Тихонова И.О., Толстых Т.О. Развитие подходов ответственного производства и потребления в отрасли минеральных удобрений // Хим. пром. сегодня. 2023. № 5. С. 19.
 26. Kochetkov S.P., Khromov S.V., Akaev O.P. Intensification of heat and mass transfer in industrial plate devices for the production of defluorinated superphosphoric acid // Proc. of the VI Intern. Scient. Conference "Theoretical and Experimental Foundations of Equipment Construction". Krakow. 2003. R100. Z. 5-M. P. 3.
 27. Мухина М.Т., Боровик Р.А., Коршунов А.А. Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития // Плодородие. 2021. № 4. С. 77.
 28. Лапушкин В.М., Игралиев Ф.Г., Лапушкина А.А. и др. Оценка эффективности NPK-удобрения с замедленным высвобождением элементов питания // Агрехимический вестник. 2023. № 5. С. 22.
 29. Pandey S., Joshi N., Kumar M. Agrochemicals and Human Well-Being: A Review in Context of Indian Agriculture // Int. J. of Chem. Stud. 2020. V. 8 (1). P. 1539.
 30. Алтынбаева Э.Р., Ахметова И.Г. Технологии использования вторичных энергетических ресурсов при эксплуатации и их учет при проектировании // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2010. № 3. С. 6.
 31. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Федурлов А.С., Шинкевич А.И. Компьютеризированная система принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // ТОХТ. 2021. Т. 55. № 1. С. 67–75.
 32. Налетов В.А., Глебов М.Б., Равичев Л.В., Налетов А.Ю. Оптимальная организация сложных химико-технологических объектов на основе общей теории систем // Теорет. основы хим. технологии. 2022. Т. 57. № 2. С. 141.
 33. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 3–2019 "Производство меди".
 34. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 12–2015 "Производство никеля и кобальта".