

## 1. Краткое содержание работы

На основе фундаментальных научных исследований разработаны высокоэффективные пульсационные аппараты периодического и непрерывного действия (в том числе работающие в резонансном режиме), а также высокоэффективные перемешивающие устройства с вращательным движением рабочего органа – конические мешалки, обеспечивающие низкие энергозатраты при создании достаточного уровня перемешивания в аппаратах, в том числе объемом несколько тысяч кубометров (для очистных сооружений).

Научной базой высокоэффективных методов перемешивания являются принципы, являющиеся развитием фундаментальных положений в области моделирования и оптимизации химических реакторов чл.-корр. АН СССР М.Г. Слинько, академиком АН СССР Г.К. Боресковым, в области химико-технологических систем академиком РАН П.Д. Саркисовым и других ученых на основе многоуровневого подхода – от квантово-химического, далее – масштаба частиц, капель, пузырей, пор катализатора, межзерновых каналов, аппарата, установки, до уровня цеха, завода и экосистемы. Данный подход был развит и перенесен нами на широкий класс процессов в жидкофазных системах и реализован в различных видах оборудования – реакторах (в том числе для проведения гетерофазных реакций), экстракторах для жидкостной и твердофазной экстракции, перемешивающих устройствах различного типа, в том числе для переработки сточных вод.

Указанные *общие для различных типов аппаратов принципы* заключаются в следующем:

1) Направлять и концентрировать вводимую в аппарат энергию в той зоне аппарата (химического реактора, экстрактора, устройства очистных сооружений), где её трансформация в полезную работу наиболее необходима: в зоне осадка в аппаратах суспендирования или растворения твердой фазы (очистные сооружения, аппараты для различных химических реакций с твердой фазой), в зоне формирования капель и пузырей (в

газожидкостных реакторах и жидкостных экстракторах), в межзерновых каналах и внутри пор капиллярно-пористых частиц при экстрагировании (экстракторы для фармацевтической и лесохимической промышленности). в идеальном случае нужно обеспечить доставку энергии к межфазной поверхности, теряя минимальное количество энергии в сплошной среде вдали от поверхности частиц. Эта энергия нужна для организации умеренного перемешивания по объему аппарата в целом либо по одной из его ступеней.

2) В среднем по объему аппарата создавать минимальный уровень диссипации энергии и поддерживать циркуляцию в объеме аппарата на минимально необходимом уровне, позволяющем обеспечивать выравнивание полей температуры и концентраций по объему, во избежание чрезмерных энергозатрат;

3) Длительность воздействия на обрабатываемую гетерогенную систему в зоне высокой плотности энергии должна быть достаточной для проведения массообменных процессов, но не избыточной, чтобы исключить непроизводительные затраты энергии.

4) Оптимизация геометрических параметров перемешивающих устройств и аппаратов с целью снижения энергозатрат и повышения эффективности.

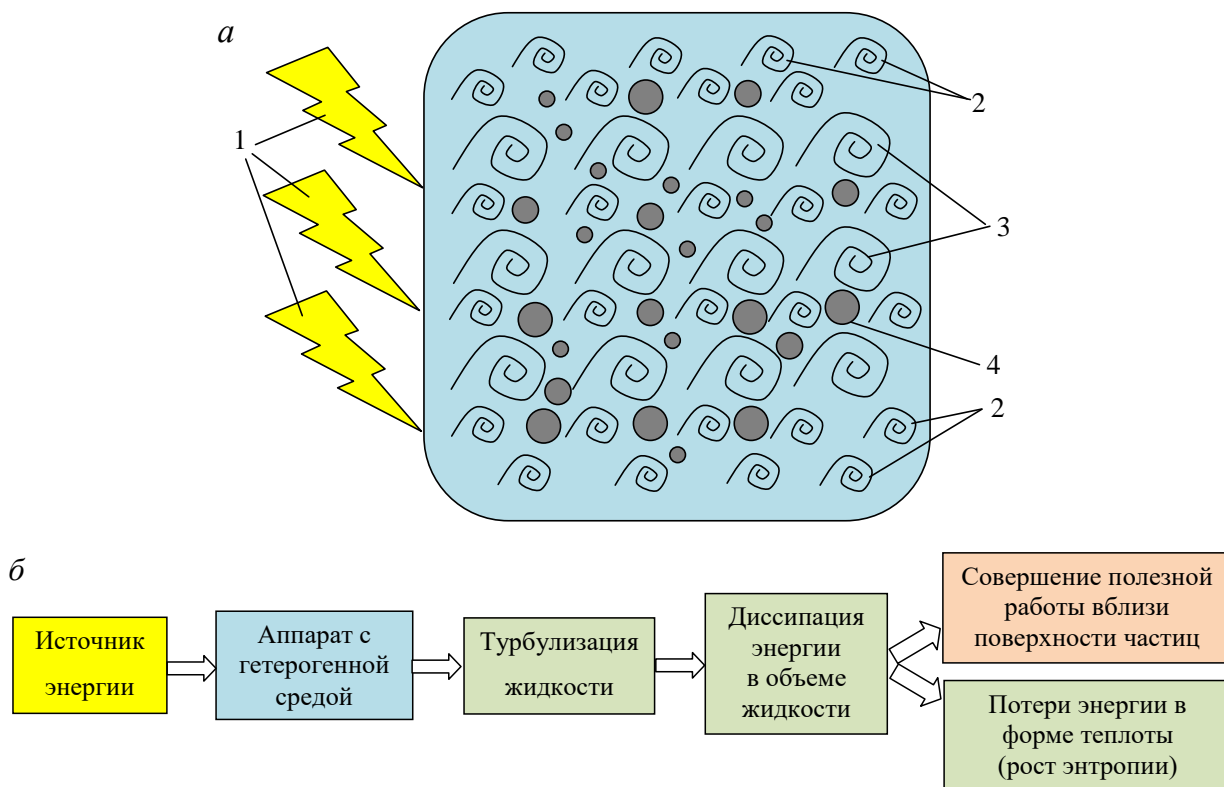
5) Адаптация характеристик перемешивающих устройств (вращательного движения, с организацией пульсаций в аппаратах как периодического, так и проточного типа) и аппаратов, а также режимов их работы к свойствам перемешиваемых сред: для мешалок вращательного движения – организация направленного веерного импульса, для пульсационных аппаратов – создание условий для низкочастотных колебаний на резонансной частоте системы «аппарат – обрабатываемая среда».

Ряд особых рекомендаций разработан *для пульсационных аппаратов нового поколения:*

1) Возбуждение колебаний в аппарате с частотой, близкой к собственной частоте системы, т. е. происходит *генерирование резонансных колебаний* [12, 13]. Это способствует тому, что энергия, вводимая в аппарат, расходуется с наибольшей эффективностью, что приводит к снижению энергозатрат, приведенных к единице получаемого продукта.

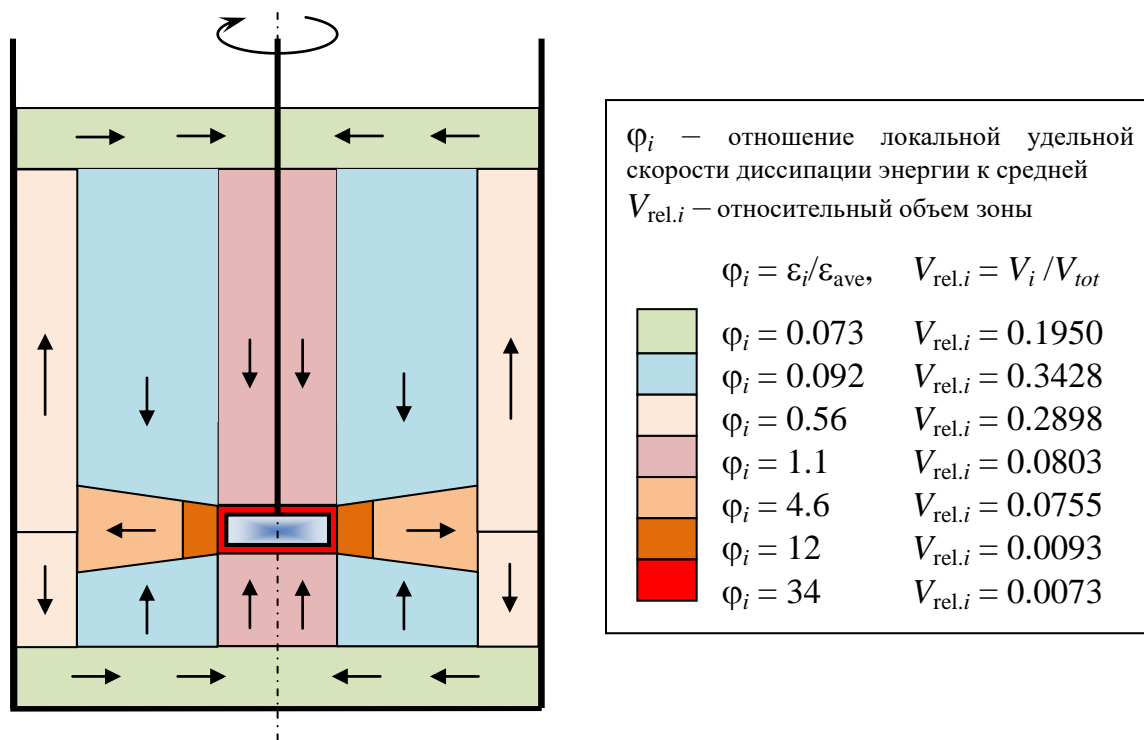
2) Для рационального использования энергии целесообразно, чтобы *временные* и *пространственные масштабы* воздействия на систему "аппарат – гетерогенная среда" были согласованы с геометрическими, физическими и физико-химическими свойствами элементов этой системы на следующих уровнях: мезоуровень (аппарат и его элементы); микроуровень (частицы, капли, пузыри); субмикроуровень (поры и микроканалы в частицах).

На рис. 1 представлена обобщенная схема преобразования вводимой в аппарат энергии *при неконтролируемом вводе энергии* в аппарат.



**Рис. 1.** Схема преобразования вводимой в аппарат энергии *при неконтролируемом вводе энергии* (турбулизация всего объема жидкости): а – схема аппарата и распределения вводимой энергии по всему объему; б – этапы трансформации энергии. 1 – источник энергии; 2 – пристеночная турбулентность; 3 – турбулентные вихри вдали от стенок (почти изотропная турбулентность); 4 – частицы дисперсной среды.

При перемешивании в стандартных реакторах коэффициент массоотдачи от поверхности частиц твердой фазы, пузырьков газа или капель жидкости недостаточно высокий в среднем по аппарату и распределен крайне неравномерно, поскольку вблизи перемешивающих устройств удельная скорость диссипации энергии от  $10^3$  до  $10^4$  раз выше, чем в среднем по объему аппарата, см. рис. 2.



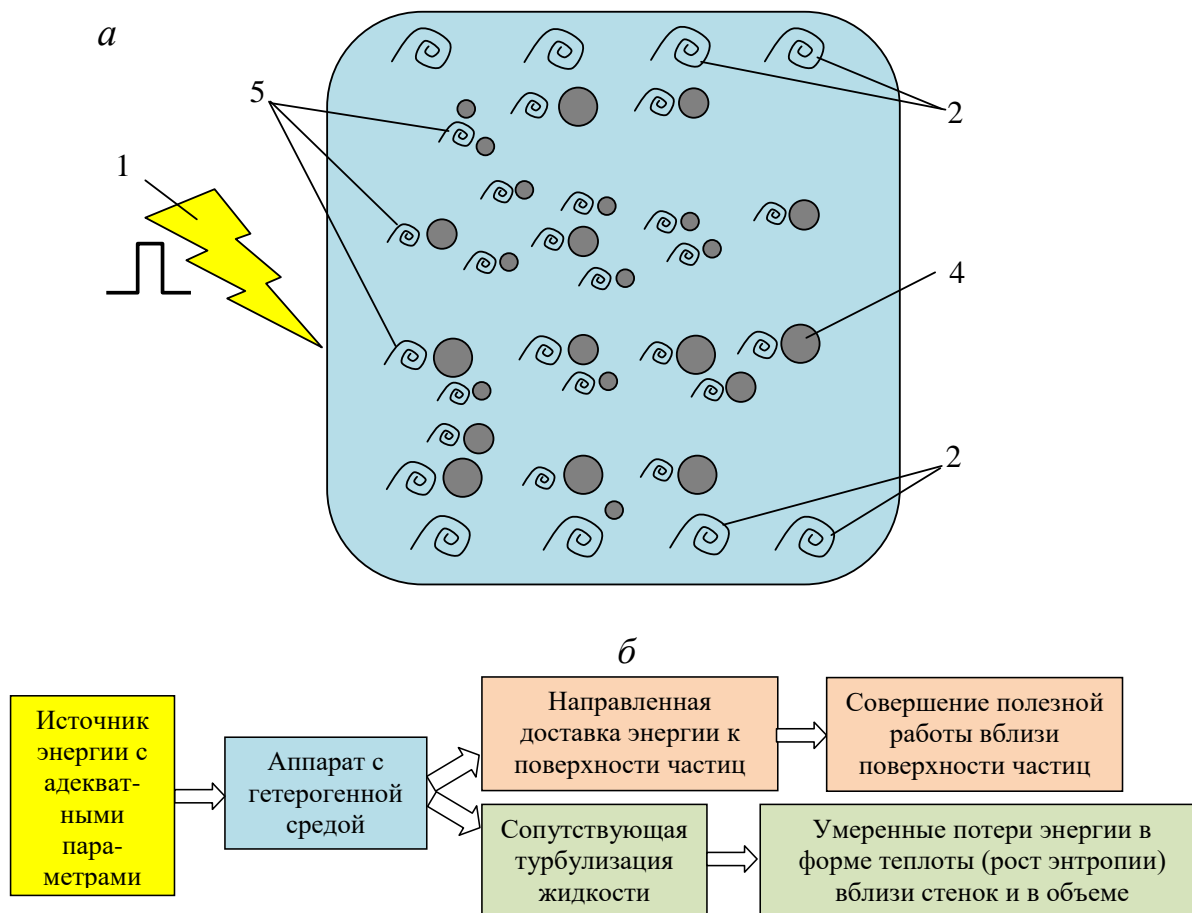
**Рис. 2.** Схема распределения удельной скорости диссипации энергии в аппарате с одним из лучших традиционных перемешивающих турбинной мешалкой. Рисунок создан по данным Алопеуса с сотр. (1999).

## 2. Основная научно-техническая идея и практические достижения

Нами разработаны теоретические основы методов интенсификации процессов перемешивания в химико-технологической и биотехнологической аппаратуре на различных уровнях — от макро- до микромасштаба, с использованием различных форм движения перемешиваемых сред и различных способов эффективной трансформации вводимой в аппарат энергии (главным образом механической) в деформацию элементов жидкости — при вращательном движении перемешивающих устройств новых типов, при динамически уравновешенных колебаниях элементов

вибрационных аппаратов, пульсациях давления, скорости и ускорения, при генерировании пульсаций в движущемся потоке многофазных сред (за счет периодической геометрии аппарата).

Пример такой стратегии показан на рис. 3: энергия в аппарат вводится направленно, с целью сокращения затрат и повышения полезного эффекта.



**Рис. 3.** Схема преобразования вводимой в аппарат энергии: при направленном подводе энергии к месту совершения полезной работы: а – схема течения; б – этапы трансформации энергии. 1 – источник энергии; 2 – пристеночная турбулентность; 3 – турбулентные вихри вдали от стенок (почти изотропная турбулентность); 4 – частицы дисперсной среды; 5 – локальная диссипация энергии вблизи поверхности частиц.

К практическим достижениям можно отнести разработку комплекса методов для интенсификации массообменных процессов в оборудовании химических и смежных отраслей промышленности, на предприятиях очистки сточных вод, а также создание нового поколения высокоэффективного оборудования – пульсационных аппаратов, в том числе резонансных и

проточных, конических мешалок. Технические решения по пульсационным аппаратам защищены более чем 25 патентами на изобретения, по коническим мешалкам – 4 патентами на изобретения.

### **3. Краткая оценка новизны, актуальность, эффективность и результативность**

Сфера применения аппаратов с перемешивающими устройствами достаточно широка, а доля затрат на перемешивание в структуре себестоимости продукции часто превышает 50%. Например, в процессе очистки сточных вод одной из актуальных задач является снижение затрат на перемешивание иловой смеси, а также аэрацию сточных вод, так как 80% потребляемой предприятиями электроэнергии приходится именно на эти процессы.

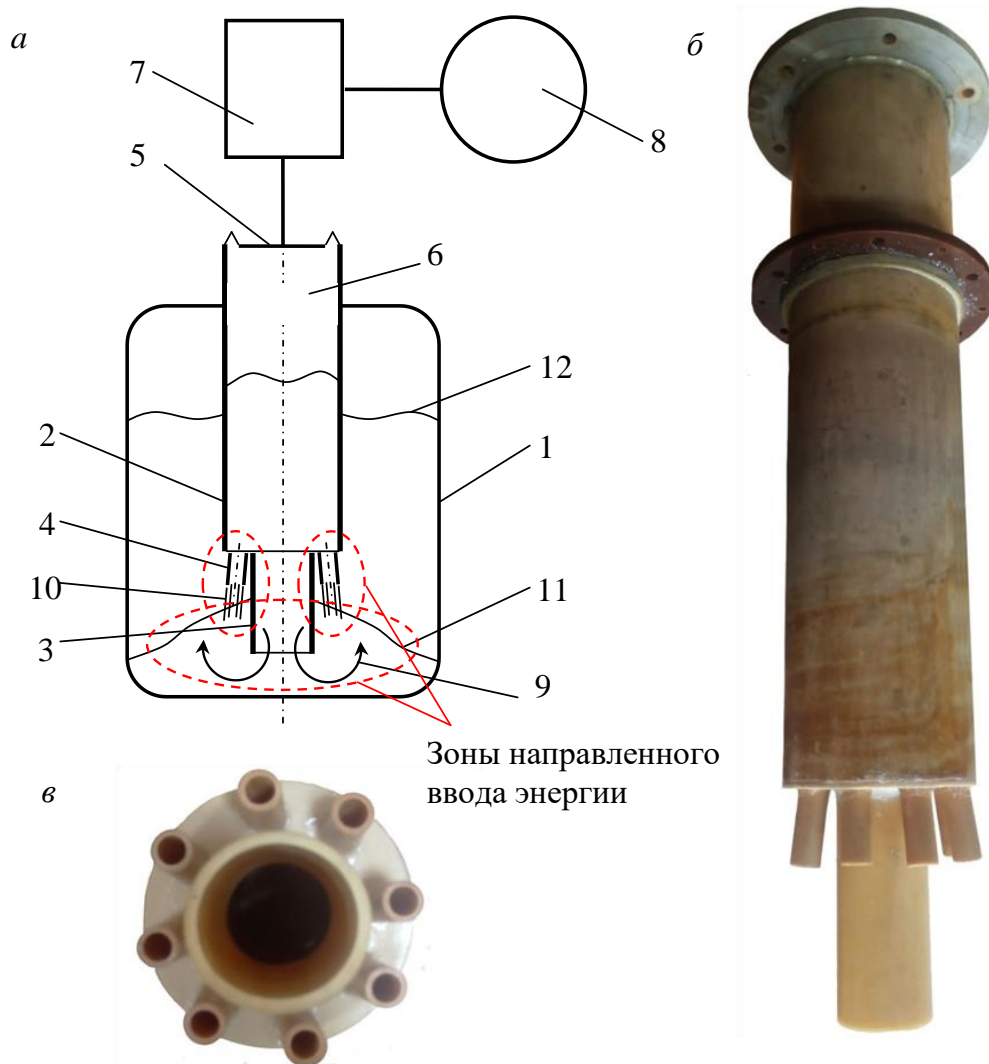
Кроме того, качество перемешивания оказывает существенно влияние на процессы диспергирования пузырей газа, капель, экстрагирования из твердой фазы, и влияет на интенсивность массообменных процессов: растворения, абсорбции, жидкостной экстракции и экстрагирования из твердого, проведения гетерофазных химических реакций. Таким образом, качество перемешивания играет ключевую роль при создании нового, конкурентоспособного оборудования химической, фармацевтической, биотехнологической, пищевой отраслей промышленности.

Созданные в данной работе оборудование – пульсационные аппараты периодического действия (преимущественно резонансные) и проточного типа, методы их математического моделирования и расчета, а также перемешивающие устройства нового поколения – конические мешалки, позволили достичь целого ряда полезных эффектов:

Эффективность и результативность разработанных высокоэффективных перемешивающих устройств пульсационного и вращательного типов заключается в следующем: 1) в увеличении выхода продукта (настоек, экстрактов); 2) в увеличении скорости массообменных процессов – от 1,6 до 10 раз; 3) в многократном снижении энергетических

затрат на проведение процесса; 4) в существенном (не менее 1,6 раз) повышении производительности оборудования.

На рис. 4 показан пульсационный резонансный аппарат с двухступенчатой центральной трубой и дополнительными соплами – прототип дегидрататора, использованного на предприятии ГК «Роскосмос».



**Рис. 4.** Схема пульсационного резонансного аппарата с двухступенчатой центральной трубой и дополнительными соплами (а) и фотографии трубы с соплами – вид сбоку (б) и снизу (в): 1 – корпус аппарата; 2 – центральная труба; 3 – нижний патрубок; 4 – сопла; 5 – упругая мембрана; 6 – газонаполненный упругий элемент; 7 – привод возвратно-поступательного движения; 8 – электродвигатель; 9 – вихри на выходе из нижнего патрубка (после начала взвешивания осадка); 10 – струи жидкости; 11 – слой твердой фазы (перед пуском привода); 12 – поверхность жидкости.

Эти преимущества открывают возможности по широкому применению высокоэффективных перемешивающих устройств – пульсационных

аппаратов нового поколения и конических мешалок в различных отраслях промышленности – химической, фармацевтической, пищевой, в биотехнологиях и в очистке производственных и бытовых сточных вод.

#### **4. Сравнение с существующими отечественными и зарубежными аналогами**

Разработан и в 2017 году запущен в эксплуатацию пульсационный резонансный дегидрататор для производства амидола и амидола ОСЧ на одном из предприятий ГК «Роскосмос», экономический эффект – 5,8 млн рублей в год. ФГУП «Нижегородский завод лекарственных препаратов «Фитофарм-НН» использует пульсационные экстракторы, выход флавоноидов увеличился в 3,3 раза, а продолжительность процесса сократилась от 28 до 38 раз. Для ОАО «Акрон» в пульсационном аппарате достигнуто снижение концентрации фторидов в 20 раз за 32 секунды.

При замене перемешивающего устройства в промышленном аппарате для суспендирования известнякового молочка при нейтрализации серной кислоты на предприятии ОАО «Святогор» удалось снизить мощность, расходуемую на перемешивание, по сравнению с существующей мешалкой на 40%; коническая мешалка наиболее интенсивно воздействует на зону подачи кислоты, где протекает реакция нейтрализации, что приводит к значительному сокращению времени реакции (в 1,6 раза). Внедрение перемешивающих устройств на предприятии АО «Полиметалл» привело к сокращению энергопотребления более чем в 5 раз.

Разработанные мешалки были внедрены на предприятии ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» (УГМК «Холдинг»). Плохое качество перемешивания негашеной извести приводило к образованию большого количества осадка непрореагировавшего вещества на стенках и на дне реактора, забивая патрубки отвода прореагировавшей пульпы, вызывая постоянные поломки откачивающих насосов. Требовалось проводить регулярное техническое обслуживание реактора, сопровождаемое технологическими остановками (см. рис. 5а).



а



б



**Рис. 5.** Фотография внутреннего пространства реактора для перемешивания негашеной извести: а – при использовании стандартной мешалки; б – после замены на разработанную нами коническую мешалку. Даже через 6 месяцев непрерывной работы залежи отсутствуют.

После внедрения новых перемешивающих устройств было достигнуто:

- 1) увеличение продолжительности безостановочной работы (см рис. 4б);
- 2) экономия потребляемой электроэнергии в объеме 1140 кВт в день;
- 3) экономический эффект на одной мешалке составил 153900 рублей в месяц.

## **5. Достигнутый экономический и/или социальный эффект**

Предприятиями ОАО «Акрон» (г. Великий Новгород) и ФГУП «Нижегородский завод лекарственных препаратов «Фитофарм-НН» (г. Нижний Новгород) приобретены неисключительные лицензии на 4 патента.

Технические решения по трем патентам на изобретения (№№ 2683078, 2732709, 2738083) используются на предприятии АО «Астерион» при разработке проектов перемешивающих устройств и аппаратов с перемешивающими устройствами. По состоянию на 01.01.2024 г. АО «Астерион» разработано и изготовлено для предприятий химической промышленности и переработки коммунальных и промышленных сточных вод 448 перемешивающих устройств, разработанных по указанным патентам. Выручка от реализации по розничным ценам 2020-2023 гг. составляет более 252 млн. рублей.