

11-107/2
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

7

1958

НОВОСИБИРСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОНОМИКА

- Я. А. Мазовер. Районирование потребления углей и развитие угольной промышленности в Красноярском крае 3

ХИМИЯ

- Г. Н. Кожевников, П. С. Кусакин. Диаграмма состояния системы геленит — окись натрия 13
 М. А. Рожков. О полимеризации дилентена и α -пинена 23
 А. П. Штин. О фосфорнокислой соли тантала 29
 Л. Ф. Волкова. Тройная система из карбонатов лития, натрия и калия 33
 Ф. Ф. Баркова, И. С. Лилеев. Кинетика взаимодействия твердого карбоната лития с хлористым аммонием 36

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- А. Л. Перепелица, А. С. Федотов. Получение формованного металлургического кокса и бездымного энергетического топлива из слабоспекающихся углей Иркутского бассейна (коксование углей Иркутского бассейна по новой технологии) 40
 И. А. Кунин. Решение некоторых классов задач моделированием на электролитической ванне 53
 М. С. Шарловская. Исследование теплообмена в кипящем слое методом квазистационарного режима 62
 П. Г. Кротова. Интегрирование уравнений движения несимметричного гироскопа 75

БИОЛОГИЯ

- Г. С. Золотаренко. О распространении и экологии пушечного шелкопряда 87
 А. Б. Гукасян. Бактериостатическое и бактерицидное действие хвой и ее химических компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда 95
 Л. В. Попов, В. И. Шубин. Влияние лесной подстилки на температуру верхнего слоя почвы на вырубках в среднетаежной зоне 102
 А. П. Романова. Сезонная динамика бактериопланктона, его горизонтальное и вертикальное распределение в южной части Байкала 114

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Б. В. Суднишников, Н. Н. Есин. Новый принцип повышения частоты ударов пневматических молотков 125
 В. В. Власов. Некоторые результаты исследований в области электромагнитной дефектоскопии железнодорожных рельсов 127
 В. И. Кузнецов, И. С. Левин. К вопросу о колориметрическом определении индия 131

ХРОНИКА

- Некоторые итоги деятельности женшеневого комитета. И. Ф. Беликов, И. И. Брехман 133

ИЗВЕСТИЯ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР

7

НОВОСИБИРСКОЕ
КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
1958

Я. А. МАЗОВЕР

**РАЙОНИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ УГЛЕЙ И РАЗВИТИЕ
УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ**

В Красноярском крае расположены месторождения Канско-Ачинского, Минусинского, Тунгусского, Таймырского угольных бассейнов, общие запасы которых составляют 2,5 триллиона тонн, т. е. $\frac{1}{3}$ угольных запасов страны. При этом запасы угля, пригодные для разработки наиболее эффективным, открытым способом, достигают 39 млрд. т — больше, чем во всех остальных бассейнах страны, вместе взятых.

В этих условиях для Красноярского края, расположенного между двумя крупнейшими угольными бассейнами — Кузнецким на западе и Иркутским на востоке, — вопросы районирования углепотребления, размещения добычи угля особенно актуальны.

Темпы роста угледобычи в Красноярском крае за период с Октябрьской революции по настоящее время опережали темпы развития угольной промышленности в среднем по стране, но существующий уровень добычи в крае (около 11 млн. т в год — примерно 2,4% от общесоюзной) не соответствует возможностям развития угольной промышленности в крае (в эксплуатации находятся всего 5% балансовых запасов).

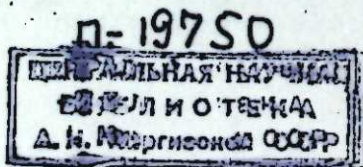
В Канско-Ачинском бассейне добывается 2,5 млн. т угля на Ирша-Бородинском карьере, 1,8 млн. т — на Назаровском, около 800 тыс. т — на трех канских шахтах и мелких шахтах местной промышленности. На Черногорском месторождении Минусинского бассейна 7 шахт дают 2,5 млн. т угля. Около 2,2 млн. т угля добывается пятью штольнями на Норильском и Кайерканском месторождениях Тунгусского бассейна.

Большая часть канских углей (добываемых на Ирша-Бородинском карьере и канских шахтах), норильских и меньшая часть назаровских и хакасских (минусинских) потребляется в Красноярском крае, куда ввозится, кроме того, 2 млн. т черемховских углей. Большая же часть назаровских и хакасских углей вывозится в Западную Сибирь.

Для определения рациональности сложившегося потребления угля в крае нами намечены экономически целесообразные зоны потребления угля различных месторождений.

Важнейшим фактором, определяющим районирование углепотребления, является производительность общественного труда по добыче, транспортировке и потреблению топлива. Наиболее показательно она отражается в стоимости для потребителя топлива, которое необходимо для получения определенного теплового эффекта; величину этой стоимости составляют издержки по добыче, транспортировке и сжиганию топлива.

Проведенные на этой основе расчеты с построением линий равной себестоимости тепла для потребителя (базирувавшиеся на данных существующей себестоимости добычи и перевозок углей, эксплуатационных расходов по сжиганию и к. п. д. котельных) легли в основу разработки



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Д-р хим. наук В. Т. Быков, член-корр. Т. Ф. Горбачев, (зам. главного редактора), член-корр. Н. П. Дубинин, д-р физ.-мат. наук Л. В. Киренский, д-р техн. наук К. Н. Коржавин, канд. экон. наук В. А. Кротов, член-корр. А. В. Николаев, член-корр. И. И. Новиков, д-р геол.-мин. наук М. М. Одинцов, канд. геол.-мин. наук Г. Л. Поспелов, д-р геол.-мин. наук И. С. Рожков, акад. С. Л. Соболев (главный редактор), д-р биол. наук К. А. Собилевская, акад. А. А. Трофимук.

Адрес редакции: г. Новосибирск, ул. Советская, 20.

рациональных зон потребления (для современного периода) красноярских и сопредельных, кузнецких и черемховских, углей.

Рациональная зона потребления канских углей в целом охватывает центральный и восточный районы края и часть Иркутской области. При этом зона потребления, рассчитанная по себестоимости только открытой добычи, значительно шире — от Новосибирска почти до Черемхово. Канские же угли подземной добычи не имеют рациональной зоны потребления, так как их себестоимость значительно выше, чем себестоимость углей остальных месторождений. Поэтому целесообразно закрыть неэкономичные канские шахты, соответственно увеличив добычу на карьерах, экономические показатели которых в 5—8 раз лучше (экономия только на эксплуатационных расходах составит до 31 млн. руб. в год).

По этим же соображениям нецелесообразно продолжать эксплуатацию ряда шахт местной промышленности (Ачинской, Бадалыкской и др.), находящихся в сфере сбыта углей карьеров.

Рациональная зона потребления назаровских и хакасских углей располагается в районе ж.-д. ветки Ачинск — Абакан и на запад от Ачинска, захватывая прилегающую к Красноярскому краю часть Западной Сибири. Правда, по расчету хакасские угли подземной добычи являются «неконкурентоспособными» (назаровские угли, доставленные в Абакан, стоят дешевле, чем хакасские на месте добычи), но из-за отсутствия крупных потребителей в районе месторождения допустим вывоз их в другие районы. Вместе с тем, это говорит в пользу развития более дешевой, открытой добычи хакасских углей.

Из намеченного районирования углепотребления прежде всего следует, что непрерывно увеличивающийся ввоз черемховских углей в Красноярский край экономически нерационален, поскольку линия равной себестоимости у потребителя канских и черемховских углей проходит значительно восточнее границы края. Невыгоден ввоз 2 млн. т углей в край при одновременном вывозе из него 3 млн. т углей.

Черемховские угли в Красноярском крае обходятся для народного хозяйства в 1,4—2,4 раза дороже, чем красноярские. Замена их канскими открытой добычи даст годовую экономию около 58 млн. руб., сократит перевозочную работу железных дорог на 1,4 млрд. ткм. Полученная экономия менее чем в два года перекроет затраты по строительству в крае карьеров, добыча угля на которых будет равна количеству ввозимого черемховского угля.

Свыше 80% ввозимого в край черемховского угля расходуется как котельное топливо. Обследование углепотребления ряда предприятий (комбайновый завод, ТЭЦ паровозоремонтного завода, мелькомбинаты и хлебозаводы в Красноярске, Канске и т. д.) показало возможность замены его красноярскими углями.

Расчеты показывают экономическую нерациональность ввоза черемховских углей (3 млн. т), а также, частично, красноярских в Западную Сибирь, так как себестоимость их здесь значительно больше, чем кузнецких углей.

Снабжение Западной Сибири и Урала кузнецкими, а не черемховскими углями позволит получить годовую экономию примерно 55 млн. руб., а если присовокупить экономию от замены и красноярских углей, то экономия составит около 75 млн. руб. Следовательно, капиталовложения на строительство в Кузбассе карьеров с мощностью добычи, равной количеству завозимых черемховских углей, окупятся в 4 года. Кроме того, перевозочная работа транспорта сократится на 4,7 млрд. ткм, высвободится до 50 тыс. вагонов.

На первом этапе, когда необходимость ввоза угля в Западную Си-

бирь из других районов еще не отпадет, целесообразна замена черемховских углей красноярскими (назаровскими, хакасскими), что снизит стоимость топлива для потребителя на 50 млн. руб., уменьшит на 2 млрд. ткм перевозочную работу железных дорог.

Большое количество угля (30% всех углей) потребляет в настоящее время железнодорожный транспорт. В связи с особенностями конструкции и работы топки паровозного котла топливо должно удовлетворять ряду требований. Лучше всего использовать смесь, составленную из углей двух видов или более.

Опытные поездки на сибирских железных дорогах и исследования Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта показали, что к. п. д. рациональной смеси каменных углей (хакасских, черемховских или кузнецких) и бурых (канских или назаровских) выше, чем к. п. д. ее компонентов — углей, сжигаемых самостоятельно.

Применять смеси, включающие красноярские угли, выгодно главным образом благодаря низкой себестоимости их добычи и значительно меньшему расстоянию перевозок, что ведет к снижению стоимости угольной смеси.

Районирование углепотребления для железных дорог, основанное на выборе наиболее экономических вариантов смесей для каждого участка, показало целесообразность применения для отопления паровозов смесей с большим содержанием местных бурых углей. Например, для главного хода Красноярской железной дороги наиболее экономично использовать смесь из 60—70% канских углей и 30—40% черемховских.

Но фактическое потребление углей железными дорогами намного отличается от намеченного по рациональной схеме: на Красноярской ж. д. доля бурых углей в общем потреблении для паровозов составила менее 40% и ни на одном участке не достигла даже 50%.

Предлагаемая рационализация углепотребления — внедрение красноярских бурых углей в шихту для отопления паровозов — даст только на Красноярской ж. д. годовую экономию примерно 12 млн. руб., капитальных затрат не потребует.

Таким образом, внедрение рациональных зон потребления углей даст большой экономический эффект.

Но, чтобы осуществить это, необходимо стимулировать потребление местных углей с помощью системы отпускных цен.

Отпускные цены на красноярские угли, действовавшие в 1949—1955 гг., были выше, чем на черемховские и кузнецкие, что стимулировало потребление в крае дальнепривозных углей (например, черемховский уголь, привезенный в пос. Назарово, был дешевле, чем назаровский на месте добычи).

Новые отпускные цены на угли, установленные с 1 июля 1955 г., приблизили соотношение отпускных цен на угли к соотношению их себестоимости, но они еще недостаточно способствуют развитию потребления и добычи красноярских углей. Зоны потребления красноярских углей, рассчитанные на основании отпускных цен, значительно уже, чем зоны, рассчитанные, исходя из себестоимости добычи. В интересах же внедрения экономического местного топлива они должны быть даже несколько шире. На канские и назаровские угли отпускная цена выше, чем себестоимость добычи, в 1,7—2,5-раза, тогда как на черемховские и кузнецкие (ленинские) всего на 20—30%.

Следовательно, для внедрения рациональных зон потребления красноярских углей целесообразно снизить отпускные цены на канские и назаровские угли.

**

Важнейшим фактором, определяющим район потребления тех или иных углей, а следовательно, и перспективные масштабы их добычи, является сравнительная экономика угледобычи в различных бассейнах, т. е. уровень капиталовложений, производительности труда, себестоимости.

Наибольшее влияние на экономические показатели угледобычи оказывает доля открытого способа в общей добыче. В 1956 г. производительность труда в угольной промышленности страны при открытой добыче была в 6,3 раза выше, чем при подземной, а себестоимость добычи 1 т — в 3,7 раза ниже. На сибирских карьерах себестоимость добычи в 2,5—7 раз ниже, чем на шахтах, а производительность труда выше в 3—7,5 раза. Удельные капиталовложения для карьеров и сроки строительства и освоения проектных мощностей в 1,5—3 раза меньше, чем для шахт.

Рассмотрев данные Центрогипрошахта [1] и ряд проектов карьеров, мы пришли к выводу, что во всех угольных бассейнах страны в перспективе возможна закладка карьеров с общей годовой мощностью более 500 млн. т. До 30% из них можно расположить в Красноярском крае: на разведанных полях Канско-Ачинского бассейна — 15 карьеров суммарной мощностью 134 млн. т, в Минусинском бассейне — 6 мощностью 16 млн. т и в Тунгусском — 2 мощностью 8 млн. т.

Следовательно, в Красноярском крае угледобычу можно вести исключительно открытым способом, что создает огромные преимущества для этого района.

Сравнение показателей перспективных карьеров на месторождениях Красноярского края, в Кузнецком бассейне, на Черемховском и Азейском месторождениях Иркутского бассейна показывает, что наилучшими они будут у основных карьеров Канско-Ачинского бассейна. Например, на Ирша-Бородинском карьере с добычей 25 млн. т в год по сравнению с месторождениями Минусинского и Кузнецкого бассейнов, производительность труда рабочего (в переводе на условное топливо) будет выше в 2,5—3 раза, себестоимость добычи 1 т условного топлива — ниже в 2,5—5 раз, капиталовложения на 1 т у. т. годовой добычи — меньше в 1,5—2,3 раза. Даже на Азейском и Черемховском месторождениях (Иркутский бассейн) и Кокуйском (Тунгусский бассейн), показатели которых больше, чем у остальных, приближаются к показателям Ирша-Бородинского карьера, при добыче 15—30 млн. т в год производительность труда будет в 1,5—2 раза ниже, чем на Ирша-Бородинском карьере, себестоимость добычи 1 т у. т. — в 2—3 раза выше, а удельные капиталовложения на 10—50% больше.

Наряду с Ирша-Бородинским, весьма благоприятные экономические показатели будут на других месторождениях Канско-Ачинского бассейна — Назаровском, Абанском, Балайском, Итатском, Боготольском.

Хорошие экономические показатели карьеров в Канско-Ачинском бассейне будут обусловлены благоприятным влиянием основных факторов, определяющих экономику открытой угледобычи, — коэффициента вскрыши, мощности карьеров, системы разработки.

Средний коэффициент вскрыши для основных карьеров Канско-Ачинского бассейна составит 1,72 м³/т при колебаниях от 0,64 до 2,65 м³/т, тогда как для карьеров Минусинского и Кузнецкого бассейнов он будет равен 5,65 м³/т (от 3 до 8 м³/т), для Черемховского и Азейского месторождений — 4,7—4,9 м³/т (от 1,8 до 10,5 м³/т), т. е. выше, чем в

Канско-Ачинском бассейне, в 2—3 раза (лишь на Кокуйском месторождении он составит 1,56 м³/т).

Мощность карьеров в Канско-Ачинском бассейне достигнет весьма больших размеров — от 8 до 25 млн. т угля в год на карьер, по Кузбассу же средняя мощность карьера составит всего 1,8 млн. т (максимальная 4,5 млн. т), по Черемховскому и Азейскому месторождениям — 1,4—1,8 млн. т (от 1 до 6 млн. т), по Изыхскому, Бейскому и Аскизскому месторождениям Минусинского бассейна — от 0,5 до 1,8 млн. т, лишь мощность карьеров на Черногорском и Кокуйском месторождениях составит 3—7,5 млн. т угля в год. Следовательно, и по мощности карьеров месторождения Канско-Ачинского бассейна превзойдут сопредельные в несколько раз.

Большая мощность канско-ачинских карьеров позволит использовать на них новейшее высокопроизводительное оборудование — экскаваторы ЭШ-50/150, ЭШ-25/100 и др., 120—180-тонные думпкары, локомотивы сцепным весом 150 т.

Благоприятные горно-геологические условия (угольный пласт мощностью 18—40 м, горизонтально залегающий под сравнительно небольшими наносами) способствуют широкому применению на канско-ачинских карьерах наиболее эффективной, бестранспортной системы разработки.

На карьерах Кузнецкого и Минусинского бассейнов из-за наклонного и даже крутого падения угольных пластов и сравнительно небольшой их мощности будут применяться в основной менее экономичные, транспортные и комбинированные системы разработки, не позволяющие использовать мощное вскрышное оборудование.

Если к тому же принять во внимание, что гидрогеологические условия в Канско-Ачинском бассейне сравнительно несложные, а буровзрывные работы требуются в значительно меньшем объеме, чем на карьерах большинства сопредельных месторождений, то станет понятным, почему экономические показатели открытой угледобычи в Канско-Ачинском бассейне будут наилучшими.

Уникальное сочетание всех благоприятных факторов предопределяет, что экономические показатели карьеров Канско-Ачинского бассейна будут самыми высокими по сравнению не только с сопредельными, но и со всеми другими угольными бассейнами страны.

Действительно, средний коэффициент вскрыши в Канско-Ачинском бассейне для карьеров с суммарной годовой добычей 134 млн. т составит 1,92 м³/т, в то время как по другим бассейнам страны он будет значительно выше — от 2,4 до 9 м³/т.

Средняя добыча на карьер в Канско-Ачинском бассейне составит 9 млн. т, тогда как в большинстве остальных бассейнов (кроме Убаганского, где могут быть карьеры такой же мощности) средняя мощность карьеров будет не более 1,5—3 млн. т, т. е. в несколько раз меньше.

В Канско-Ачинском бассейне возможно широкое применение бестранспортных систем разработки с использованием мощного горнотранспортного оборудования, в большинстве же других районов открытой угледобычи (Убаганский и Южноуральский бассейны, Приморье, Казахстан, Средняя Азия) можно применять лишь транспортные системы.

В итоге на перспективных карьерах Канско-Ачинского бассейна в расчете на добычу 134 млн. т производительность труда будет в 1,5—8 раз выше, чем по другим бассейнам, себестоимость добычи 1 т у. т. — в 1,5—4,5 раза ниже, а капиталовложения на 1 т у. т. — в 1,5—6,5 раза меньше. (Лишь по Иркутскому и Тунгусскому бассейнам капиталовложения больше, чем по Канско-Ачинскому, соответственно на 15 и 26%, а себестоимость выше на 34 и 28%, да по месторождениям Казахстана

(Экибастузское, Майкюбенское и др.) себестоимость добычи выше всего на 13%).

При увеличении годовой добычи угля в Канско-Ачинском бассейне до 50 млн. т у. т. ежегодная экономия на эксплуатационных издержках, по сравнению с издержками на добычу (даже открытым способом) эквивалентного количества угля в Европейской части СССР и на Урале, составит более 2,3 млрд. руб., экономия на капиталовложениях превысит 19 млрд. руб., число трудящихся, занятых на добыче угля, будет меньше на 50 тыс., отраслевая себестоимость 1 т угля снизится примерно на 9%.

Следовательно, в целях экономии общественного труда целесообразно развивать открытую угледобычу в Красноярском крае в возможно более широких масштабах, обеспечив при этом максимально возможное развитие различных отраслей промышленности в этом районе, чтобы можно было использовать уголь без перевозки на дальние расстояния.

Развитие угольной промышленности в крае во многом будет определяться ростом потребности в угле отраслей народного хозяйства.*

В связи с наличием в Красноярском крае огромных и дешевых топливно-энергетических ресурсов при недостатке рабочей силы его хозяйство будет развиваться по пути создания энергоемких и нетрудоёмких производств, использующих разнообразные природные богатства. Помимо огромных ресурсов самых дешевых в стране гидроэнергии и угля, здесь имеются крупные запасы алюминиевого и магниевого сырья, железных руд, меди, никеля, кобальта, древесины, месторождения молибдена, цинка, свинца, сурьмы, стройматериалов и т. д. Поэтому наибольшее развитие в крае через 2—3 пятилетки получают энергетика, цветная и черная металлургия, химическая, лесная и деревообрабатывающая отрасли промышленности, производство стройматериалов, машиностроение, а также нефтеперерабатывающая промышленность.

Помимо строительства крупнейших гидроэлектростанций (Красноярской, Енисейской, Нижне-Саянской), в крае намечается строительство ряда тепловых электростанций (Назаровской ГРЭС и др.), которые будут работать в единой энергосистеме с гидравлическими. Тепловые станции будут крупнейшими потребителями угля; при этом себестоимость 1 кВт-ч на мощных станциях, использующих дешевые угли, составит 2 коп. и менее, т. е. будет в 4—6 раз ниже, чем в среднем по стране сейчас.

Важными потребителями угля (в качестве технологического и котельного топлива) явятся крупные комплексы цветной металлургии, создание которых намечается в крае.

Значительное количество угля, возможно, потребуется газовым заводам, которые целесообразно создать на базе дешевых углей, а также нефтеперерабатывающему заводу. В несколько раз увеличат потребление угля бурно растущая промышленность стройматериалов, горнорудная, химическая, лесная и др. Транспорту потребуются угля намного меньше вследствие электрификации железных дорог.

В итоге перспективное потребление угля в крае к 1970—1975 гг. достигнет 70—80 млн. т в год, в том числе около 20 млн. т — для конденсационных электростанций, 10 млн. т — для технологических нужд, 4 млн. т — для коксования и т. д.

Крупнейшим районом потребления угля (20—24 млн. т) в крае

* При определении потребности края в угле использованы работы Московского отделения Гидроэнергопроекта, Красноярской экспедиции СОПС АН СССР, Теплоэлектропроекта и др.

будет Западный (Ачинско-Назаровский), главным образом в связи со строительством Назаровской ГРЭС, цементного завода и других предприятий.

Примерно 7—8 млн. т угля будет использовать Центральный (Красноярский) район. Основными потребителями угля в этом районе будут предприятия цветной металлургии, машиностроения, химической и деревообрабатывающей промышленности, производства стройматериалов.

В Восточном (Канском) районе может потребоваться углей 14—18 млн. т благодаря строительству мощных электростанций и, возможно, газового завода.

Потребление угля в Енисейском районе, где на базе энергии Енисейской ГЭС намечается создание промышленного комплекса, составит 16—18 млн. т (в том числе 4 млн. т для коксования). Главными потребителями здесь будут завод черной металлургии, комплекс предприятий цветной металлургии, лесная и деревообрабатывающая промышленность.

В Южном (Абакано-Минусинском) районе, при условии создания комплекса предприятий цветной металлургии — главного потребителя угля, углепотребление достигнет 6—7 млн. т.

В Норильском районе основная часть угля будет использоваться горнометаллургическим комбинатом, а общая потребность района в угле составит 3—3,5 млн. т.

Районирование потребления углей для перспективного периода проводилось нами с учетом возможных будущих масштабов потребления и добычи угля в крае. Заметим, что при определении рациональных зон потребления красноярских и сопредельных углей в качестве исходных принимались показатели только открытой добычи угля, поскольку в бассейнах Красноярского края, а также в Иркутском и Кузнецком она может развиваться в огромных масштабах, а целью перспективного районирования углепотребления является именно определение масштабов развития добычи на угольных месторождениях.

На основании перспективных экономических показателей добычи углей на карьерах [1], перевозки их по железным дорогам [2] и сжигания в котельных крупных электростанций (по данным Теплоэлектропроекта) были построены: 1) линии равной себестоимости тепла у потребителя при использовании красноярских и сопредельных углей, 2) линии равных капиталовложений, 3) линии равной себестоимости, скорректированные с учетом окупаемости дополнительных капиталовложений за 10 лет, 4) линии равных трудовых затрат (построение последних интересно в связи с большой трудоемкостью добычи и перевозки угля и недостатком рабочей силы на востоке страны).

По большинству направлений линии равных капиталовложений и равных трудовых затрат смещены по отношению к линиям равной себестоимости на сравнительно небольшое расстояние.

В результате рациональная зона потребления ирша-бородинских углей охватывает в широтном направлении большую часть Красноярского края — от Ачинска на восток, включая Красноярский и Канский районы с суммарным потреблением более 24 млн. т в год, — а также западную часть Иркутской области с Братским промышленным районом, потребление которого составит около 9 млн. т углей (по расчетам Гидроэнергопроекта).

Такие большие масштабы потребления угля требуют реконструкции Ирша-Бородинского карьера с увеличением добычи до 25 млн. т в год, что удовлетворит на первый период нужды указанных районов. При этом себестоимость добычи 1 т составит около 4,8 руб./т, а производитель-

ность труда рабочего — около 1150 т/месяц. В дальнейшем на месторождении может быть заложен еще один карьер с годовой производительностью 15—20 млн. т и примерно такими же показателями, поскольку коэффициент вскрыши не превысит 0,8—0,9 м³/т, а мощность вскрыши — 35—60 м.

В качестве резервных месторождений, требующих, однако, освоения района и строительства ж.-д. веток, могут использоваться Балайское и Абанское (70—80 км на запад и восток от Ирша-Бородинского) с показателями, приближающимися к показателям Ирша-Бородинского.

Зона назаровских углей охватывает западную часть края — большую часть района вдоль ж.-д. ветки Ачинск — Абакан, Ачинско-Назаровский район (с потреблением более 20 млн. т угля), а также часть Томской и Кемеровской областей до ст. Тайга.

В связи с этим необходима реконструкция Назаровского карьера, чтобы его годовая мощность достигла 8 млн. т (с себестоимостью добычи 6,5 руб/т и производительностью труда рабочего до 900 т/месяц), и в дальнейшем строительство второго карьера мощностью 15 млн. т. Но даже оба этих карьера смогут удовлетворить потребности только прилегающих районов. Между тем потребуется ввоз около 16 млн. т угля в Енисейский район. Кокуйское месторождение на левом берегу Ангары, где возможно строительство двух карьеров с добычей 8 млн. т, себестоимостью 15 руб/т, нельзя рассматривать на ближайший период в качестве основной базы снабжения Енисейского района, так как для этого потребуется сооружение дорогостоящей паромной переправы через Ангару, прокладка ж.-д. веток на обоих берегах и по льду реки зимой. Перевозка же угля из Назарово в Абалаково обойдется по 4,5 руб/т и позволит загрузить порожние вагоны, следующие после перевозки на юг руды, леса, металла.

Следовательно, целесообразно максимально развивать добычу на Назаровском месторождении. Углями его в первое время будут снабжаться и районы Енисейска и Боготола. Но с развитием здесь промышленности назаровские угли не смогут удовлетворить потребность этих районов в угле. Тогда должны будут вступить в строй карьеры на Итатском и Боготольском месторождениях, тем более, что на их базе также намечается сооружение крупных электростанций.

Зона потребления хакасских углей для энергетики невелика — это в основном Абакано-Минусинский район и часть железной дороги Сталинск — Абакан — Тайшет в радиусе 200—300 км от Абакана. Потребность в хакасских углях не превысит 6—7 млн. т, она может возрасти лишь после положительных результатов исследований применения этих углей для коксования.

Целесообразно развивать открытую добычу в первую очередь на Черногорском месторождении, где лучшие в бассейне экономические показатели (себестоимость добычи 22—24 руб/т), и лишь с дальнейшим ростом потребности в этих углях — на Изыхском и Бейском.

Норильские угли будут потребляться в основном в районе их добычи. В связи с тем, что потребность в этих углях увеличится (до 3—3,5 млн. т) и к тому же 2 шахты мощностью 850 тыс. т до 1970 г. выйдут из строя, необходимо построить угледобывающие предприятия мощностью 1,5—1,7 млн. т. Часть необходимого угля может быть получена, если построить карьеры на Кайерканском месторождении. Первый карьер на поле шахты № 19 с добычей 400 тыс. т может быть заложен уже сейчас при капиталовложениях около 80 руб/т.

Анализ экономических показателей угледобычи и рациональных зон потребления углей позволяет сделать вывод о целесообразности разви-

тия добычи угля в крупных масштабах в первую очередь на Ирша-Бородинском и Назаровском месторождениях.

Преимущества этих месторождений заключаются не только в лучших горно-геологических условиях и экономических показателях добычи (показатели Ирша-Бородинского карьера — наилучшие в стране), но и в освоении районов: наличии здесь действующих карьеров, поселков, ж.-д. веток, основных кадров работников; освоение же других районов требует больших затрат средств и труда, длительных сроков. Эти месторождения отличает также их благоприятное территориальное размещение и концентрация угледобычи в бассейне, что позволит лучше использовать высокопроизводительное оборудование, сэкономить большие средства на сооружение вспомогательных предприятий и т. д.

Необходима безотлагательная разработка комплексных проектов развития Ирша-Бородинского и Назаровского месторождений.

Как видно из изложенного, ресурсы дешевых углей в крае столь велики, что даже при покрытии потребностей перспективных топливемких производств значительная часть их остается неиспользованной.

В этих условиях встает вопрос об использовании местных углей на мощных станциях, которые будут вырабатывать электроэнергию и передавать ее в Западную Сибирь и на Урал.

Большой интерес представляет сравнение экономичности передачи на Урал энергии, вырабатываемой станциями на красноярских углях, с экономичностью энергии от станций, работающих на углях других бассейнов, и с перевозкой углей этих бассейнов для электростанций Урала.

Такие расчеты проведены на основании данных Теплоэлектропроекта для передачи 12,1 млрд. кВт-ч электроэнергии в год под напряжением 600 кв при мощности 2000 тыс. квт; мощность электростанции принята в 2400 тыс. квт.

Расчеты показали, что в случае сооружения линии электропередачи Назаровское месторождение — Урал суммарные эксплуатационные расходы на добычу угля, выработку и передачу энергии на Урал будут ниже, чем при перевозке кузнецких, экибастузских, челябинских, башкирских углей для выработки того же количества энергии на уральских станциях и при передаче на Урал энергии, вырабатываемой станциями в Кузбассе, Башкирии, Кушмуруне, Челябинске (расходы при передаче на Урал энергии от станции, работающей на экибастузских углях, примерно равны расходам при передаче по линии Назарово — Урал).

Себестоимость на Урале энергии, полученной при передаче по линии Назарово — Урал, составит около 2,5 коп/квт-ч, т. е. будет в 3 раза ниже, чем сейчас в Уральской энергосистеме.

Однако капитальные затраты при использовании кушмурунских и экибастузских углей и перевозке кузнецких углей на Урал будут значительно ниже, чем при передаче энергии по линии Назарово — Урал на переменном токе, и разница в капиталовложениях окупится лишь за 16—25 лет и более.

В случае же электропередачи по линии Назарово — Урал на постоянном токе под напряжением 600 кв значительно уменьшаются капитальные затраты и эксплуатационные расходы, и дополнительные капиталовложения при этом будут окупаться за 5—8 лет за счет экономии на эксплуатационных расходах.

Кроме того, число трудящихся, занятых на добыче угля, выработке энергии и передаче ее на Урал по линии Назарово — Урал, будет на 4500—9000 меньше, чем при осуществлении железнодорожной перевозки углей других месторождений на Урал, и на 300—3000 меньше, чем при осуществлении других вариантов электропередачи.

Следовательно, можно сделать предварительный вывод об экономической эффективности рассмотренного варианта передачи электроэнергии по линии Назарово — Урал и необходимости конкретного проектирования такой передачи на постоянном токе для получения более точных данных.

Все изложенное показывает большие перспективы развития угольной промышленности в Красноярском крае и важность разработки проблем развития топливно-энергетической базы в Сибири.

Красноярская комплексная
Экспедиция Совета по изучению
производительных сил
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
7/1 1958

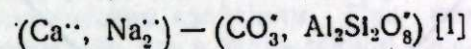
ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ горно-технических условий с целью выделения площадей для организации добычи угля открытым способом. Фонды Центрогипрошахта, 1954—1956.
2. Методы определения экономической эффективности различных видов транспорта. Трансжелдориздат, М., 1956.

Г. Н. КОЖЕВНИКОВ, П. С. КУСАКИН

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ГЕЛЕНИТ — ОКИСЬ НАТРИЯ

В настоящее время систематические исследования взаимных систем и обменного разложения в сплавах солей охватили большой экспериментальный материал. Однако при изучении силикатных систем мало еще внимания уделяется явлениям равновесия, касающимся так называемых взаимных солевых пар. С этой точки зрения частично исследована лишь система



Выбор системы геленит — окись натрия для термического исследования в условиях фазового равновесия обусловлен определенными свойствами этих веществ.

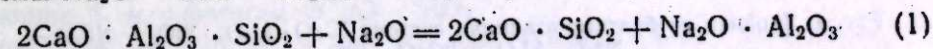
Ряд шлаков доменных и электрометаллургических печей содержит в своем составе глинозем (до 30%), который в основном находится в форме геленита. Большая часть таких шлаков не используется. Извлечение глинозема из них представляет определенный интерес для алюминиевой промышленности. Один из методов переработки этих шлаков — разложение геленита в шлаке содой.

Авторами ряда работ [2, 3] установлена принципиальная возможность разложения геленита содой при высоких температурах, но систематических исследований по этому вопросу нет.

Наши исследования показали, что геленит можно рентабельно разложить как спеканием, так и сплавлением его с содой. Последний процесс, по нашему мнению, является наиболее перспективным.

Знание определенных условий охлаждения расплава, оптимального количества вводимой щелочи и фазового состава позволит лучше организовать процесс переработки геленитсодержащих шлаков на глинозем.

Взаимодействие геленита со щелочью протекает в области четвертой системы $Na_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ по реакции [4]



В данном случае имеются четыре вещества, связанные между собой уравнением обменного разложения (1). Поэтому, система, образованная этими солями, является взаимной, а пары $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, Na_2O и $2CaO \cdot SiO_2$, $Na_2O \cdot Al_2O_3$ — взаимные пары солей. Несмотря на то, что в системе четыре вещества, число независимых компонентов по правилу фаз равно трем, так как количество четвертого обуславливается количеством трех других.

Графическое изображение такой системы по методу, предложенному Е. Йенеке [5], может быть представлено квадратом, в углах которого по диагонали располагаются два вещества, стоящие по одну сторону знака равенства (рис. 1).

Стороны квадрата представляют собой четыре двойные системы, из

Полученные таким образом составы после химических анализов принимались за исходные.

По сравнению с расчетным, количество вводимой щелочи уменьшалось (она улетучивалась), что вело к изменению состава. Колебания составляли от 5 до 20%, в зависимости от температуры и количества вводимой окиси натрия. В процессе приготовления исходных составов потери щелочи соответственно учитывались.

Определение температур начала кристаллизации расплава и конца, т. е. исчезновения жидкой фазы, производилось для каждого из приготовленных составов статическим методом закалки. В закалочных образцах с помощью микроскопа определялись характер и число фаз. Далее кристаллические фазы идентифицировались по их оптическим свойствам. Жидкости при закалке образовывали стекло. Опыты проводились в угольной электрической печи сопротивления, внутри которой была помещена фарфоровая трубка для изоляции термопары от восстановительной среды. Температура регулировалась включением и выключением печи вручную с точностью $\pm 10^\circ$. Измерение ее производилось платиноплатинородной термопарой, которую после серии опытов проверяли по эталонной термопаре до 1200° и по точке плавления $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (1544°). Горячий спай термопары помещался почти в контакте (примерно на расстоянии 2—3 мм с пробой, заключенной в платиновый пакетик, который подвешивался в температурном центре печи. Вокруг него на расстоянии 5—6 мм опытным путем была установлена зона, в которой падение температуры составляло всего один градус.

Продолжительность опыта, необходимая для достижения равновесия в пробе изучаемой системы, требует нагревания одновременно нескольких закалочных проб различного состава. Поэтому применяли сразу 3—4 маркированных и связанных платиновой проволокой пакета. Отдельная проба весом 5—10 мг помещалась в пакетик размером $6 \times 6 \times 0,5$ мм. Складки (швы) пакетиков тщательно заделывались во избежание вытекания расплава, но не настолько герметично, чтобы воспрепятствовать удалению воздуха при нагревании. Вскрытие пакетиков после проведения опыта не представляет трудности.

В качестве закалочной среды применялся четыреххлористый углерод. Для большей достоверности результатов наряду с методом закалки был использован динамический метод кривых нагревания. Это позволило точнее определить линии совместных кристаллизаций твердых фаз. Рентгеноструктурный анализ проб, соответствующих полям диаграммы состояния, подтвердил природу и количество твердых фаз, установленных микроскопическим анализом.

В табл. 1 приведены результаты опытов методом закалки (пяти составов). Для каждого из них были определены температуры ликвидуса и начала кристаллизации твердых фаз.

В табл. 2 помещены данные опытов, полученные по методу кривых нагревания. Результаты исследования использованы для построения диаграммы равновесия. Изучаемый диагональный разрез в пределах тройной системы $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ характеризуется шестью областями (рис. 2). Явления депрессии, происходящие в случае прибавления одного вещества к другому, дают — в соответствии и с правилом фаз Гиббса — моновариантную связь между концентрацией образующегося раствора и температурой кристаллизации из раствора первичной твердой фазы. Кривая AC, соответствующая выделению первичных кристаллов геленита, понижается до пересечения с ветвью CB в точке минимума C при $1435 \pm 10^\circ$ и 10,8% Na_2O .

При дальнейшем увеличении концентрации Na_2O в расплаве получа-

Таблица 1

Результаты опытов, проведенных методом закалки

Коэффициент при окиси натрия в стекле (± 0,005)	Состав, вес. %		Температура, °C	Продолжительность опыта, мин.	Фазы
	геленит	Na_2O			
1,616	81,5	18,5	1490	10	Стекло
1,616	81,5	18,5	1480	10	Очень мало алюмината в стекле
1,618	81,5	18,5	1450	15	Много алюмината в стекле
1,621	81,5	18,5	1400	30	Много алюмината в стекле, следы двухкальцевого силиката
1,621	81,5	18,5	1350	30	Алюминат натрия, двухкальцевый силикат, мало стекла
1,621	81,5	18,5	1335	50	Алюминат натрия, двухкальцевый силикат, редко стекло
—	81,5	18,5	1325	60	Алюминат натрия, двухкальцевый силикат, следы геленита
1,616	86,68	13,32	1480	10	Стекло
1,616	86,68	13,32	1470	10	Очень мало алюмината натрия в стекле
1,618	86,68	13,32	1390	15	Умеренное количество алюмината натрия в стекле
1,618	86,68	13,32	1380	25	Алюминат натрия, следы двухкальцевого силиката, стекло
1,618	86,68	13,32	1335	30	Алюминат натрия, двухкальцевый силикат, редко стекло
—	86,68	13,32	1325	50	Алюминат натрия, двухкальцевый силикат, следы геленита
1,610	88,5	11,5	1450	20	Стекло
1,610	88,5	11,5	1430	20	Стекло, следы алюмината натрия в стекле
1,610	88,5	11,5	1400	25	Стекло, алюминат натрия, следы геленита
1,612	88,5	11,5	1340	40	Геленит, алюминат натрия, редко стекло
—	88,5	11,5	1320	60	Геленит, алюминат натрия, следы двухкальцевого силиката
1,620	89,5	10,5	1460	10	Стекло
1,616	89,5	10,5	1450	10	Следы геленита в стекле
1,610	89,5	10,5	1430	15	Умеренное количество геленита в стекле, следы алюмината натрия
1,610	89,5	10,5	1330	50	Геленит, алюминат натрия, мало стекла
—	89,5	10,5	1320	60	Геленит, алюминат натрия, следы двухкальцевого силиката
1,621	90,5	9,5	1500	10	Стекло
1,621	90,5	9,5	1485	15	Следы геленита в стекле
1,620	90,5	9,5	1450	15	Умеренное количество геленита в стекле
1,620	90,5	9,5	1430	30	Геленит, стекло, следы алюмината натрия в стекле
1,616	90,5	9,5	1340	60	Геленит, алюминат натрия, редко стекло
1,616	90,5	9,5	1320	60	Геленит, алюминат натрия, следы двухкальцевого силиката

ем восходящую кривую CB, имеющую максимум в точке B при 1480° и 18,5 вес. % Na_2O . Сплавы, фигуративные точки которых попадают в области ACa и CBve, первично выделяют при затвердевании соответственно геленит и алюминат натрия. Линия aCe соответствует кристаллизации эвтектики геленита и алюмината натрия. При температуре сплавов в точке e $1330 \pm 10^\circ$ происходит кристаллизация тройной эвтектики.

Линия ev соответствует совместной кристаллизации двухкальцевого силиката и алюмината натрия. Ниже указанной температуры отсутствует жидкая фаза. Сплавы этой области окончательно затвердевают в смесь трех компонентов: геленита, двухкальцевого силиката и алюмината натрия. Построенная диаграмма дает возможность предполагать,

Таблица 2

Состав и температуры кристаллизации сплавов (диаграммы состояния системы геленит — окись натрия)

Состав, вес. %		Температура кристаллизации фаз, °С
геленит	Na ₂ O	
81,5	18,5	1400
86,68	13,32	1330, 1385
88,0	12,0	1328
88,2	11,8	1328, 1370
89,0	11,0	1340, 1388

Таблица 3

Состав и температуры кристаллизации сплавов (разреза I—I)

геленит	Состав, вес. %		Температура кристаллизации фаз, °С
	Na ₂ O · Al ₂ O ₃	2CaO · SiO ₂	
33,0	27,6	39,4	1325, 1366
33,0	23,9	43,1	1328
33,0	22,0	45,0	1329, 1385

что точка тройной эвтектики находится на линии, соответствующей составу в точке *e* (см. рис. 2), внутри треугольника *e*₁*Ce*₂ (см. рис. 1).

Для определения точки тройной эвтектики в системе алюминат натрия — двухкальциевый силикат — геленит были проведены дополнительные исследования методом кривых нагревания, результаты которых помещены в табл. 3.

Кривая нагревания второго сплава имеет только одну остановку, соответствующую появлению жидкой фазы. В этой точке *E* находятся в равновесии одна жидкая и три твердых фазы. При температуре плавления в тройной точке происходит обратимая реакция $J \rightleftharpoons 2CaO \cdot SiO_2 + Na_2O \cdot Al_2O_3 + 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$. В точке тройной эвтектики состав сплава — 33 вес. % геленита, 23,9 вес. % Na₂O · Al₂O₃ и 43,1 вес. % 2CaO · SiO₂.

Кривая нагревания третьего сплава имеет две остановки. Первая соответствует появлению жидкой фазы, вторая — растворению в жидкой фазе кристаллов двухкальциевого силиката.

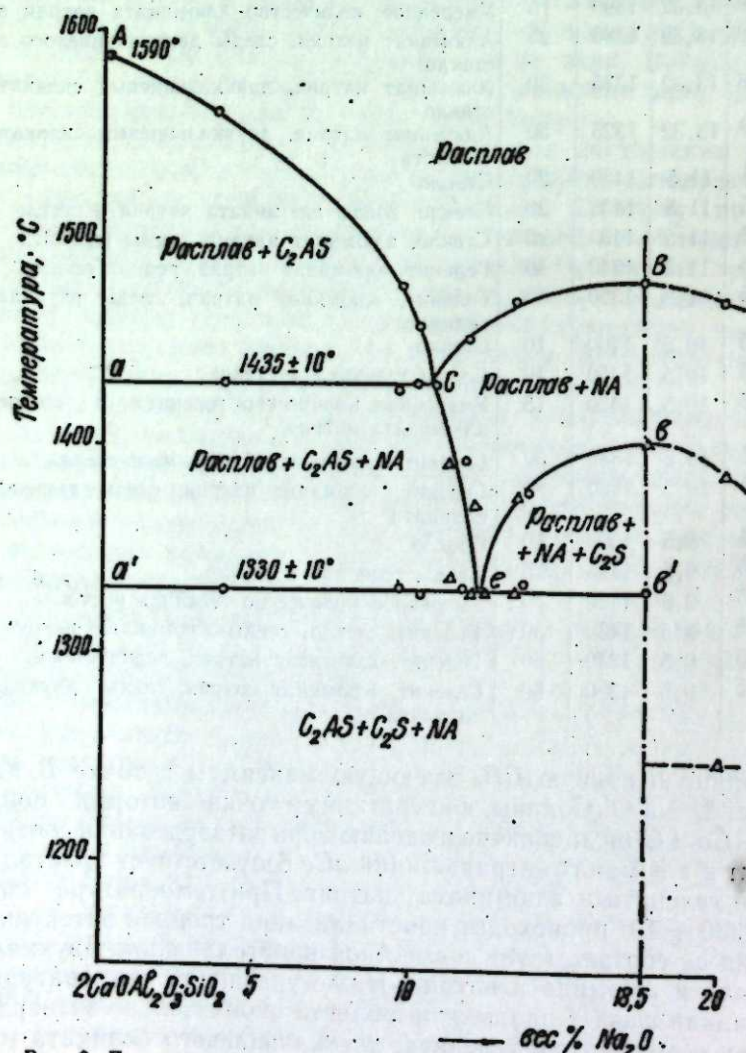


Рис. 2. Диаграмма состояния системы геленит — окись натрия.

На кривой нагревания первого сплава — две остановки. Первая соответствует появлению жидкой фазы, вторая — растворению кристаллов алюмината натрия (рис. 3).

Кривая нагревания второго сплава имеет только одну остановку, соответствующую появлению жидкой фазы. В этой точке *E* находятся в равновесии одна жидкая и три твердых фазы. При температуре плавления в тройной точке происходит обратимая реакция $J \rightleftharpoons 2CaO \cdot SiO_2 + Na_2O \cdot Al_2O_3 + 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$. В точке тройной эвтектики состав сплава — 33 вес. % геленита, 23,9 вес. % Na₂O · Al₂O₃ и 43,1 вес. % 2CaO · SiO₂.

Кривая нагревания третьего сплава имеет две остановки. Первая соответствует появлению жидкой фазы, вторая — растворению в жидкой фазе кристаллов двухкальциевого силиката.

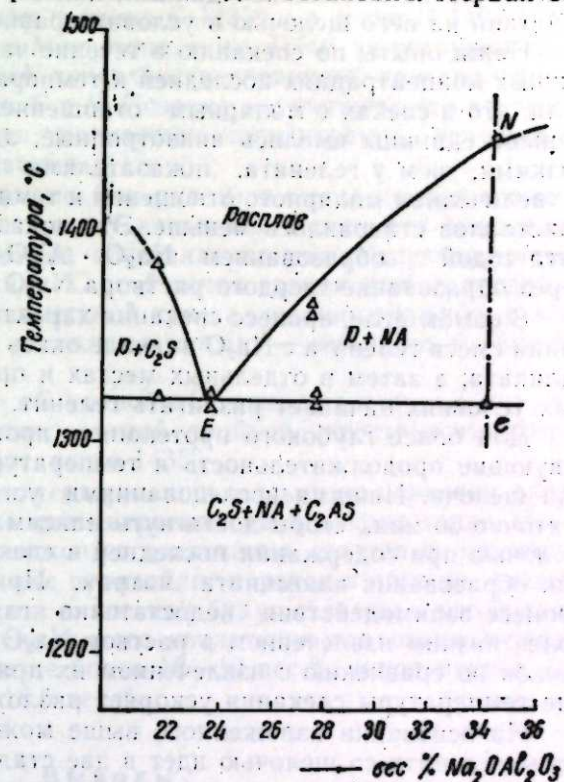


Рис. 3. Разрез I—I.

Обсуждение результатов

1. Данные микроскопического анализа показали, что оптические свойства кристаллов геленита в закаленных пробах при добавлении Na₂O не изменились. Рентгеноструктурным анализом установлено, что параметры решетки геленита также остались без изменения. Это указывает на то, что в равновесных условиях геленит не образует твердого раствора с Na₂O.

Однако известно, что как природный, так и содержащийся в шлаках, геленит в чистом виде не встречаются. В природном гелените в отдельных случаях имеется до 6% щелочей [12] в виде твердого раствора благодаря частичному замещению кальция натрием. Некоторые исследователи [13, 14] считают, что в природных мелилитах замещение кальция натрием происходит только в ограниченных пределах, без разрушения структуры. Б. М. Куплетский [15] отмечает, что среди минералогов нет единого мнения о составе мелилитов и особенно о его натриевой составляющей. Исследованиями Дж. Р. Гольдшмидта [16] определено, что геленит способен растворить в себе до 15 вес. % Na₂O · 3SiO₂ (или 3,85% Na₂O). Образование твердого раствора, по мнению Гольдшмидта, происходит за счет замещения ионов Ca, Al ионами Na, Si. Полученные им данные соответствуют условиям равновесия, однако, по нашему мнению, нельзя считать обоснованным утверждение, что если в гелените растворяется 15% щелочного силиката, то обязательно растворится и 3,85% Na₂O. Другими словами, в данном случае имеются две различные системы: геленит — Na₂O · 3SiO₂ и геленит — Na₂O. Поэтому совершенно

неизвестно из имеющихся данных, каково поведение геленита при воздействии на него щелочью в условиях равновесия.

Наши опыты по спеканию в течение часа геленита с содой при различных концентрациях последней и температурах от 1000 до 1200° показали, что в спеках с молярным отношением окиси натрия к гелениту меньше единицы имелись анизотропные, одноосные кристаллы с более низкими, чем у геленита, показателями преломления — 1,642 — 1,646. С увеличением молярного отношения и температуры спекания указанных кристаллов становилось меньше. Это показывает, что разложение геленита содой с образованием $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ происходит через образование твердого раствора Na_2O в гелените.

В самом деле, процесс спекания характеризуется тем, что при нагревании смеси геленита с Na_2O вначале окись натрия внедряется в решетку силиката, а затем в отдельных местах и при определенных благоприятных условиях начинает разлагать геленит.

Для более глубокого протекания процесса необходимы соответствующие продолжительность и температура при постоянном содержании щелочи. Нашими исследованиями установлено, что при 1100° достаточно 60 мин., чтобы достигнуть максимального разложения геленита щелочью при содержании последней в спеке в количестве, необходимом для образования алюмината натрия. При спекании в течение 30 мин. процесс взаимодействия недостаточно глубокий, что подтверждается более низким извлечением в раствор Na_2O и Al_2O_3 при выщелачивании спеков по сравнению с извлечением их при часовом спекании. Увеличение температуры спекания ускоряет разложение.

На основании изложенного выше можно полагать, что взаимодействие геленита со щелочью идет в две стадии: 1) равномерное внедрение щелочи внутрь кристаллической решетки геленита и частичное замещение кальция натрием до определенных пределов с образованием твердого раствора; 2) разрушение твердого раствора. Период разрушения сокращается с ростом температуры и особенно с увеличением концентрации окиси натрия.

Таким образом, образование твердого раствора щелочи в гелените, по-видимому, можно объяснить, тем, что у природного геленита и у геленита в шлаках в основном неравновесные условия. Например, быстрое затвердевание расплавленного шлака ведет к тому, что щелочь не успевает прореагировать с геленитом, вторая стадия процесса очень сильно заторможена. Различные примеси также могут тормозить разложение геленита.

2. Опыты по спеканию двухкальцевого силиката и алюмината натрия при 1200° в течение двух часов, а также сплавление их при температурах выше 1350° показали, что в спеке и затвердевшем сплаве отсутствует геленит. Это позволяет считать, что реакция (1) идет преимущественно в одном направлении — слева направо. Поэтому изучаемая система, согласно классификации А. Г. Бергмана и Н. С. Домбровской [17], может быть отнесена к классу тройных необратимо-взаимных систем.

Результаты исследования показали, что максимум кривой *CB* (см. рис. 2) совпадает с ординатой 50 мол. % Na_2O . Поскольку реакция обратима, то подъем кривой должен быть круче. Как видно на рис. 2, кривая *CB* в пределах тройной системы $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ имеет пологий характер, что свидетельствует об обратимости реакции (1).

Однако, если учесть, что область первичной кристаллизации алюмината натрия занимает значительную площадь диаграммы (см. рис. 1),

что в точках совместной кристаллизации относительно высокая температура плавления (например, в точке *C* 1435° и в точке *B* 1400°), а у алюмината натрия, по данным Мотигтона, т. пл. 1650°, то нетрудно представить пологий характер всей поверхности первичной кристаллизации от алюмината натрия до точек *C* и *B*. Поэтому мы считаем, что постепенное понижение кривой *CB* при увеличении концентрации геленита не исключает необратимости реакции (1).

3. На построенной диаграмме (см. рис. 2) имеется кривая совместной кристаллизации алюмината и двухкальцевого силиката (линия *ев*), а, как отмечалось выше, система алюминат натрия — двухкальцевый силикат имеет только эвтектику. С этой точки зрения можно предполагать, что, если есть кривая совместной кристаллизации геленита и алюмината натрия (линия *aCe*), то система геленит — алюминат натрия будет иметь эвтектику.

Горизонтальный участок *aC* кривой *aCe* свидетельствует о том, что температура плавления предполагаемой двойной эвтектики геленит — алюминат натрия должна быть выше 1435°.

4. При переработке геленитсодержащих шлаков на глинозем следует учитывать, что увеличение концентрации окиси натрия выше 18—19 вес. % приведет к резкому снижению извлечения полезных компонентов при выщелачивании, так как произойдет переход в другую систему (см. рис. 1), где окиси натрия и алюминия будут связаны в тройные соединения. Поэтому для максимального извлечения глинозема нужно в расплав вводить практически не более 18—19 вес. % окиси натрия (оптимальное ее количество ~ 18,5 вес. %).

Выводы

1. На основании экспериментальных данных построена диаграмма плавкости системы геленит — окись натрия (до 20 вес. % Na_2O).

2. В системе геленит — двухкальцевый силикат — алюминат натрия установлена тройная эвтектическая точка, в которой состав сплава — 43,1% $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 33,0% $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и 23,9% $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ с т. пл. 1330 ± 10°.

3. Установлено, что наилучшего извлечения глинозема из геленита можно достигнуть в том случае, если: а) концентрация вводимой окиси натрия равна 18—19 вес. % Na_2O , б) достигнуто равновесие.

Уральский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
13/VII 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Eitel, Synthese der Feldspatvertreter, Leipzig, 1925.
2. Ф. Н. Строков, В. А. Мусяков, Е. Я. Иткина, О реакциях взаимодействия в пределах системы $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CaO}$ при плавлении. Тр. ГИПХ, вып. 32, 1940.
3. Г. Г. Уразов, Я. Е. Вильянский, Н. В. Морачевский, К теории извлекательно-петровского способа получения глинозема из природных алюмосиликатов и бокситов с высоким содержанием кремнезема. ЖПХ, т. 1, вып. 2, 1928.
4. И. С. Лилеев, Химия и технология окиси алюминия, ч. 1, 1940.
5. E. Jänecke, Gesättigte Salzlösungen vom Standpunkt der Phasenlehre. Halle, 1908.
6. G. Rankin, H. Wright, Ternary System $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Amer. J. Sci., Ser. 4, vol. 39, 1915.
7. И. С. Лилеев, Получение окиси алюминия из тихвинских бокситов по способу ГИПХа, Тр. ГИПХ, вып. 28, 1936.

8. K. T. Green, K. H. Bogue, The System $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. J. of Research of Nat. Bureau of Standards, vol. 36, № 2, 1946.
9. Д. С. Белянкин, В. В. Лапин, Н. А. Торопов, Физико-химические системы
10. А. М. Китайгородский, Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и силикатной технологии, Промстройиздат, М., 1954.
11. Ю. М. Бутт и др., Синтез силикатов, алюминатов и ферритов кальция и рентгенографическое их исследование. Сб. научн. работ по стеклу под ред. Д. С. Белянкина. Промстройиздат, М., 1950.
12. В. В. Лапин, Петрография металлургических и топливных шлаков. Изд. АН СССР, 1956.
13. R. W. Nurse, H. G. Midgley, The investigation melilite solid Solution. J. Iron and Steel Inst., 174 (2), 1953.
14. H. Bergman, Composition of the melilite group. J. Miner. Soc. Amer., vol. 14, № 11, 1929.
15. Б. М. Куплетский, Меллитовые породы в щелочном комплексе Ениского района Кольского полуострова. Изв. АН СССР, сер. геол. № 3, 1948.
16. J. R. Goldsmith, Some melilite solid Solution. J. Geology, 56, № 5, 1948.
17. А. Г. Бергман, Н. С. Домбровская, Об обменном разложении в отсутствие растворителя. ЖРФХО, т. 61, вып. 8, 1929.

А. М. РОЖКОВ

О ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДИПЕНТЕНА И α -ПИНЕНА

Способность терпеновых углеводородов к полимеризации и изомеризации под влиянием света, тепла и катализаторов установлена давно.

Впервые полимеризацию терпенов наблюдал А. Г. Гуревич [1]. Он установил, что при действии флорида на α -пинен наряду с камфеном образуется и некоторое количество политерпенов.

К. Н. Коротков и Х. А. Черчес [2], подвергая полимеризации α -пинен и скипидар действием фосфорного ангидрида, получили низкомолекулярные полимеры в виде густых смол темно-коричневого цвета.

В. Г. Плюснин с сотрудниками [3, 4] изучили полимеризацию α -пинена, дипентена, камфена и скипидара в присутствии HF , AlCl_3 , $\text{BF}_3 \cdot 2\text{CH}_3\text{COOH}$, синтетического алюмосиликата. Установлено, что указанные катализаторы полимеризуют терпены до тетрамера, представляющего собой твердый продукт, напоминающий по внешнему виду канифоль, с т. пл. $60-70^\circ$. Наибольший выход твердого полимера (50—53%) был получен при полимеризации индивидуальных терпенов и скипидара в присутствии фтористого водорода.

Имеются также указания [5], что при полимеризации терпеновых углеводородов в растворителях в присутствии хлористого алюминия образуется смесь твердых и жидких полимеров с выходами до 75—76%.

Твердые и полутвердые полимеры были синтезированы В. Робертс и А. Дей [6] при полимеризации α - и β -пиненов в присутствии катализаторов Фридель-Крафтса. Установлено, что β -пинен полимеризуется легче и дает более высокоплавкие полимеры, чем его α -изомер. Полимеры β -пинена имеют т. пл. от 104 до 136° , и выход их составляет от 54 до 93%, в зависимости от рода катализатора; полимеры α -пинена плавятся при $67-85^\circ$, выход их от 14 до 35%.

Помимо приведенных работ, имеется значительное число патентных сообщений по полимеризации скипидара и индивидуальных терпенов под влиянием сильных минеральных кислот и других катализаторов. Полученные смолы пригодны для приготовления лаков, добавок к каучуку и для других целей. Так, например, ациклические и циклические терпены (аллооцимен, оцимен, мирцен, α - и β -пинены, дипентен) в инертных летучих растворителях в присутствии трехфтористого бора полимеризуются в продукты, которые рекомендуются в качестве пластификаторов, клейких композиций и заменителей каучука в ряде изделий [7].

Несмотря на то, что вопросом полимеризации терпеновых углеводородов посвящено большое количество работ, в литературе нет данных относительно способности этих соединений к полимеризации по «свободно-радикальному» механизму. Большинство исследователей процесс полимеризации терпенов осуществляло в растворах органических растворителей с применением сильных минеральных кислот и других катализаторов ионного типа (AlCl_3 , AlBr_3 , BF_3 , HF).

В связи с этим представляло интерес изучить поведение терпеновых углеводородов в присутствии инициаторов радикальной полимеризации.

В задачу нашего исследования входило также выяснение способности дипентена и α -пинена к образованию полимерных соединений под влиянием малоизученных катализаторов ионного типа: хлористого цинка и хлористого кальция. Можно было ожидать, что с указанными катализаторами реакция полимеризации терпенов пойдет менее бурно, чем под действием сильных минеральных кислот, а также хлористого и бромистого алюминия или фтористого водорода. Предполагалось также, что в присутствии хлористого цинка и хлористого кальция некоторые побочные процессы, сопровождающие полимеризацию, например, реакция гидродегидрогенизации, мало вероятны.

При изучении полимеризации α -пинена, кроме того, ставилась цель выяснить, происходит ли полимеризация данного бициклического терпена непосредственно или же ей предшествует изомеризация в моноциклическое соединение.

Полимеризация терпеновых углеводородов проводилась при нагревании без доступа воздуха. Чтобы получить полимеры с максимальной степенью полимеризации, дипентен и α -пинен полимеризовались в блоке в отсутствие органических растворителей.

Взятый для работы дипентен был выделен из скипидара разгонкой под вакуумом с высоким дефлегматором после предварительного высушивания поташом. Дипентеновая фракция подвергалась повторной разгонке на колонке Бардышева, погоно-разделительная способность которой составляла 25 теоретических тарелок.

Выделенный продукт имел следующие физико-химические константы: т. кип. — 177—178°, d_4^{20} — 0,8486, n_D^{20} — 1,4744, тетрабромид дипентена плавился при 125°.

α -пинен получали из α -пиненовой фракции. Фракция сузилась сульфатом натрия и подвергалась ректификации на колонке Бардышева.

Чистый продукт имел константы: т. кип. — 156°, d_4^{20} — 0,8565, n_D^{20} — 1,4658, нитрозохлорид α -пинена плавился при 103°.

Опыты полимеризации дипентена и α -пинена в присутствии инициаторов радикального типа.

В качестве инициаторов реакции радикальной полимеризации были взяты перекись бензоила и динитрил азонзомасляной кислоты.

Опыты проводили в запаянных ампулах из толстостенного стекла при 60, 80 и 100°. Перед заполнением ампулы обрабатывались горячей хромовой смесью, затем промывались дистиллированной водой и высушивались при 120°. Нагревались они в воздушном термостате, температура в котором поддерживалась с точностью до 1° С. Инициатора брали в одних случаях 1%, в других — 2% от веса исходных терпенов.

Однако, как оказалось, ни дипентен, ни α -пинен в интервале температур от 60 до 100° в течение 100 часов практически не полимеризуются и не подвергаются никаким изменениям.

Оба терпена не полимеризуются также в водных эмульсиях в присутствии персульфата калия, динитрила азонзомасляной кислоты и перекиси бензоила, взятых в количестве 1,6% от веса углеводорода. Остальные компоненты в опытах эмульсионной полимеризации применялись в следующих соотношениях: эмульгатора (олеат натрия или детское мыло) 3—4%, воды 200—250% от веса мономера. Опыты проводились при 50, 60 и 70° в течение 50 часов. В качестве реакционного сосуда

использовалась колба, снабженная механической мешалкой с ртутным затвором.

Отсутствие полимеризации дипентена и α -пинена, когда применяются инициаторы радикального типа, показывает, что терпеновые углеводороды относятся к тем непредельным мономерам, которые полимеризуются избирательно: или с инициаторами радикального типа, или с ионными катализаторами.

Опыты полимеризации дипентена и α -пинена в присутствии катализаторов ионного типа

В присутствии хлористого цинка и хлористого кальция реакция проводилась в запаянных ампулах в воздушном термостате при $70 \pm 1^\circ$. Катализатора брали 7% от веса углеводорода. Опыт длился 70 часов. Кроме того, дипентен и α -пинен при прочих равных условиях полимеризовали первый при 178°, второй при 156°, что соответствует температурам кипения данных терпенов.

По окончании опытов ампулы охлаждались, затем вскрывались и производилось исследование продуктов полимеризации.

Полимеры дипентена и α -пинена отделялись следующим образом. Реакционная смесь для удаления катализатора перемешивалась с разбавленным (5-процентным) раствором соляной кислоты. Водный слой отделялся, а углеводородный тщательно обрабатывался 5-процентным раствором едкого натра, после чего многократно промывался водой до нейтральной реакции и разгонялся в вакууме для удаления терпенов, не подвергшихся полимеризации. Полученные полимеры очищались пересаживанием из ацетона метанолом и высушивались до постоянного веса.

Для характеристики свойств полимеров мы определяли их растворимость, молекулярный вес (криоскопическим методом с применением бензола в качестве растворителя) и физико-химические константы; произвели также элементарный анализ полимеров на содержание углерода и водорода. Полученный экспериментальный материал представлен в табл. 1. (Данные опытов с применением в качестве катализатора хлористого кальция в таблице не приводятся, так как в этом случае полимеризации терпенов не произошло).

Из табл. 1 видно, что в присутствии хлористого цинка дипентен и α -пинен полимеризуются с образованием лишь низкомолекулярных продуктов, выход которых возрастает с повышением температуры полимеризации.

Результаты анализа показывают, что элементарные составы поли-терпенов и мономера совпадают.

Близость физико-химических констант и свойств полимеров дипентена и α -пинена свидетельствует об идентичности их строения. Но полимеры одинаковой структуры могли образоваться из одинаковых по строению мономерных соединений. Отсюда следует, что процессу полимеризации одного из терпенов должна предшествовать реакция изомеризации. Учитывая способность бициклических терпенов изомеризоваться в моноциклические, и, в частности, α -пинена в дипентен, можно предположить, что начальным этапом в процессе полимеризации α -пинена является изомеризация его в дипентен, который затем полимеризуется.

Сказанное подтверждается наличием дипентена в составе дистиллята, полученного при вакуум-разгонке продуктов полимеризации α -пинена. Физико-химический анализ дистиллята показал, что при высокотемпературной полимеризации (156°) он состоит, главным образом, из дипентена с примесью исходного терпена, а при низкотемпера-

Таблица 1

Каталитическая полимеризация дипентена и α -пинена в присутствии хлористого цинка
(продолжительность опыта 70 часов)

Название терпена	Температура полимеризации, °С	Выход полимера, %	Характер полимера	Растворимость полимеров	d_4^{20}	n_D^{20}	Средний молекулярный вес	Найдено, %	
								С	Н
Дипентен	70	26,6	Густая желтая жидкость	Растворяются в ацетоне, диэтиловом и петролейном эфире, бензоле, хлороформе	0,9440	1,5180	340	87,98	11,88
	178	49,0	Густая маслянистая темно-желтая жидкость	Растворяются в ацетоне, диэтиловом и петролейном эфире, бензоле, хлороформе	0,9477	1,5137	307	88,10	11,87
α -пинен	70	18,0	Густая желтая жидкость	Растворяются в метаноле, этаноле	0,9461	1,5167	347	88,01	12,00
	156	58,0	Густая маслянистая желтая жидкость	Растворяются в метаноле, этаноле	0,9470	1,5131	328	88,26	11,80

* Вычислено для мономера С—88,16%, Н—11,84%.

турной (70°) в дистилляте обнаружено дипентеновой фракции значительно меньше, чем исходной, α -пиненовой.

Медленно протекающий процесс изомеризации α -пинена при 70°, вероятно, является причиной того, что выход полимера в данном случае значительно ниже, чем при высокотемпературной полимеризации.

Если в качестве катализатора применяется хлористый кальций, дипентен и α -пинен не полимеризуются.

Дистилляты, полученные при вакуум-разгонке содержимого ампул из опытов полимеризации терпенов в присутствии хлористого кальция, состоят из неизмененных дипентена и α -пинена. Лишь в опытах высокотемпературной полимеризации около 8% α -пинена изомеризуется в дипентен. Следовательно, хлористый кальций не только не вызывает полимеризации дипентена, но и не способствует реакции изомеризации α -пинена в дипентен.

Полимеры дипентена и α -пинена для разделения на более однородные соединения были подвергнуты разгонке в вакууме. Характеристика полученных фракций дается в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что молекулярные веса полимеров не превышают 451, что соответствует смеси низкомолекулярных продуктов, среди которых преобладают тримеры.

При сравнении продуктов, составляющих летучую часть полимеров дипентена и α -пинена, видно, что по своим константам они также сходны между собой и являются, судя по величине молекулярного веса, димерами данных терпеновых углеводородов.

Практически такие же константы приводятся в работе В. Робертс и А. Дей [6] для димера, полученного при полимеризации α -пинена (а) т. кип.—165—185°/11 мм рт. ст., d_4^{20} —0,9450, n_D^{20} —1,5103, мол. вес—294; б) т. кип.—169—180°/10 мм рт. ст., d_4^{20} —0,9441, n_D^{20} —1,5107, мол. вес—296).

В. Робертс и А. Дей предполагают, что димер образуется путем соединения двух молекул α -пинена без изомеризации, в отличие от процесса полимеризации, идущего, как установлено этими авторами, с пред-

Таблица 2

Вакуум-разгонка полимеров дипентена и α -пинена

Название полимера	Температура полимеризации, °С	Продукты разгонки полимера	Содержание, %	d_4^{20}	n_D^{20}	Т. кип., °С/мм рт. ст.	Молекулярный вес	Иодное число	Число двойных связей
Полимер дипентена	70	Летучая часть Нелетучий остаток	49,0	0,9430	1,5112	169—177/10	262	194	1,9
			51,0	0,9486	1,5220	—	420	189	3,1
Полимер дипентена	178	Летучая часть Нелетучий остаток	72,9	0,9434	1,5104	170—175/10	275	177	1,9
			27,1	0,9541	1,5290	—	451	178,6	3,15
Полимер α -пинена	70	Летучая часть Нелетучий остаток	53,2	0,9437	1,5110	172—176/10	271	198	2,1
			46,8	0,9494	1,5202	—	429	191	3,2
Полимер α -пинена	156	Летучая часть Нелетучий остаток	63,8	0,9443	1,5108	168—178/10	285	167	1,87
			36,2	0,9510	1,5264	—	413	174	2,81

Примечание: Летучая часть — почти бесцветная, прозрачная, глицериноподобная жидкость. Нелетучий остаток — очень густая, вязкая, липкая смола от темно-желтого до темно-красного и темно-коричневого цвета.

варительным вскрытием внутреннего циклобутанового кольца пинена и превращением последнего в дипентен.

Идентичность свойств димеров, полученных нами при полимеризации дипентена и α -пинена, с димером, описанным В. Робертс и А. Дей, говорят за то, что все они имеют одинаковое строение. А это могло быть в том случае, если процесс превращения α -пинена в димер предшествовала изомеризация в дипентен. Подтверждением этому, как уже говорилось, служит наличие дипентена в дистилляте, полученном при вакуум-разгонке продуктов полимеризации α -пинена. Таким образом, димер, полученный при полимеризации α -пинена, как и димер дипентена, имеет моноциклическую структуру, т. е. состоит из двух моноциклических единиц.

Число двойных связей в политерпенах, вычисленное на основании определенных по Гюблю ионных чисел и величин молекулярных весов, оказалось равным числу моноциклических единиц в полимере, т. е. на единицу меньше ожидаемого количества их. Это дает основание считать, что и в присутствии хлористого цинка процесс полимеризации дипентена и α -пинена сопровождается параллельно идущей реакцией гидродегидрополимеризации. Последняя, по-видимому, является одной из причин образования низкомолекулярных полимеров.

Существенно и то, что при высокотемпературной полимеризации терпенов количество димерных продуктов в составе политерпенов намного выше, чем в политерпенах, полученных при низкой температуре (см. табл. 2). Следовательно, с повышением температуры полимеризации терпеновых углеводородов реакция гидро-дегидрополимеризации протекает более интенсивно.

Выводы

1. Дипентен и α -пинен не полимеризуются по «свободно-радикальному» механизму в присутствии органических инициаторов.
2. Каталитическая полимеризация дипентена и α -пинена в присутствии хлористого цинка происходит с образованием смеси димеров и тримеров и сопровождается побочной реакцией гидро-дегидрополимеризации.

Под влиянием хлористого кальция полимеризации терпенов не происходит.

3. Димер, полученный при полимеризации α -пинена, аналогичен по структуре димеру дипентена, т. е. имеет моноциклическое строение.

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10/Х 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Гуревич. О действии фторидовой земли на ненасыщенные соединения. ЖРФХО, т. 47, вып. 4, 1915.
2. К. Н. Коротков, Х. А. Черчес. Каталитическая полимеризация и изомеризация терпеновых углеводородов. Изв. АН БССР, № 5, 1952.
3. В. Г. Плюснин, С. И. Черткова, Е. П. Бабин. Полимеризация индивидуальных терпенов (α -пинена, дипентена и камфена) в присутствии фтористого водорода. ЖПХ, т. XXIX, вып. 8, 1956.
4. С. И. Черткова, В. Г. Плюснин, Е. П. Бабин. Полимеризация скипидаров кислотными катализаторами. ЖПХ, т. XXIX, вып. 12, 1956.
5. M. Sargent, W. Sargent, Polymerization of Terpenes. J. Am. Chem. Soc. vol. 59, № 7, 1937.
6. W. J. Roberts, A. R. Day, A Study of the Polymerization of α - and β -Pinene with Fridel-Crafts Type Catalysts. J. Am. Chem. Soc., vol. 72, № 3, 1950.
7. Ам. пат. 2373419, 1945.

А. П. ШТИН

О ФОСФОРНОКИСЛОЙ СОЛИ ТАНТАЛА

В литературе мало указаний относительно существования соединений тантала с кислородными кислотами фосфора. По данным Вейсс и Ландеккера, приводимым Р. Абегом [1] и Гмелином [2], фосфористая и фосфорноватистая кислоты, взятые даже в избытке, не осаждают водного раствора щелочного танталата танталовой кислоты.

И. П. Алимарин и Т. А. Бурова [3] осаждали тантал фосфористой и фосфорноватистой кислотами из растворов, содержащих винную или лимонную кислоты в присутствии избытка минеральной. Состав осадка при осаждении гипофосфитом натрия, как утверждают авторы, можно представить в виде комплексной гетерополиокислоты $H[(Ta_2O_5)_2H_2PO_2]$.

В 1951 г. Хан [4] сообщил о получении фосфорноокислой соли тантала из раствора танталата калия действием избытка фосфорной и азотной кислот при нагревании на водной базе. Состав прокаленной соли соответствовал формуле $Ta_2O_5 \cdot P_2O_5$.

В настоящей работе приводятся данные об образовании фосфорнокислых солей тантала в сернокислых растворах различной концентрации в присутствии небольших количеств фосфат-ионов. Нами изучались состав прокаленного осадка фосфорноокислой соли тантала, влияние различных факторов на осаждение соли (концентрация кислоты, количество осадителя, температура и длительность взаимодействия и т. п.). При выполнении работы применялся радиоактивный изотоп тантала $Ta = 182$ с периодом полураспада 117 дней.

Исходные препараты

Фосфорноокислая соль тантала осаждалась главным образом из сернокислого танталсодержащего раствора. Содержание в нем тантала и серной кислоты определялось аналитическим путем. Исходным материалом для приготовления раствора служила чистая пятиокись тантала, содержащая 0,2% TiO_2 ; ниобий методом рентгеноспектрального анализа не был обнаружен. Для перевода в растворимое состояние пятиокись тантала сплавлялась с пиросульфатом калия. По охлаждению расплавленный сплав выщелачивался серной кислотой. Из этого раствора тантал осаждался аммиаком. Осадок пятиокиси тантала промывался на фильтре и декантацией до удаления сульфат-ионов и растворялся в концентрированной серной кислоте с добавкой перекиси водорода. Последняя разрушалась нагреванием раствора до паров серной кислоты. В качестве осадителя обычно применялся однозамещенный фосфорнокислый аммоний (или натрий) марки ЧДА.

Методы анализа

Состав фосфорноокислой соли тантала определялся весовым методом. Промытый осадок этой соли высушивался, прокаливался при тем-

пературе 1000°С и после взвешивания сплавлялся с содой. Сплав выщелачивался горячей водой. Нерастворимый остаток снова сплавлялся с содой во избежание захватывания фосфора. Соединенный щелочной фильтрат нейтрализовался азотной кислотой, кипятился 5—10 мин., и дополнительно выделившийся осадок танталовой кислоты, промытый горячей водой, присоединялся к нерастворимому остатку после сплавления с содой. Из фильтрата фосфор выделялся молибденовым реактивом. Осадок растворялся в аммиаке. Далее он обычным способом переводился в пиррофосфат магния и взвешивался.

Нерастворимый остаток от обработки содой сплавлялся с пиросульфатом калия, сплав выщелачивался серной кислотой, и тантал осаждался танином. Промытый осадок прокаливался и взвешивался в виде Ta_2O_5 .

При действии осадителя (фосфата аммония или натрия) тантал (при определенном содержании в растворе серной кислоты) полностью переходил в осадок, поэтому в дальнейшем содержание фосфорного ангидрида в некоторых полученных препаратах определялось по разности: фосфорнокислая соль тантала — Ta_2O_5 . В некоторых опытах полнота осаждения тантала проверялась радиометрически на установке типа Б.

Условия осаждения фосфорнокислой соли тантала

Осаждение фосфорнокислой соли тантала проводилось при комнатной t° и при нагревании раствора до 60—70°. К определенному объему сернокислого танталсодержащего раствора (содержание Ta_2O_5 в исходном растворе — 1 г/л) добавлялось возрастающее количество серной кислоты.

Таблица 1

Содержание в растворе H_2SO_4 , г/л	Характеристика осадка	Степень осаждения
156,8	Выпадает через 6—8 час.	Полное
289,1		
460,1		
580,1		
701,2		
843,2		
930,0		
1127,0	Через сутки раствор помутнел	Частичное
1176,3		
1225,0		
1274,0		
1320,1	Раствор слегка опалесцировал	—
1470,0		

Данные табл. 1 показывают, что тантал из сернокислых растворов осаждается при действии фосфат-иона. Полное выделение тантала возможно в растворах, содержащих до 1200 г/л серной кислоты. При более высоком ее содержании осаждение тантала неполное, а при кислотности 1400 г/л серной кислоты и выше осадки не образуются. Нагревание и перемешивание раствора ускоряют процесс осаждения фосфорнокислой соли тантала. Наиболее целесообразно производить осаждение при температуре водяной бани. При этом наблюдаются быстро появляющаяся опалесценция раствора и выпадение аморфного сильно гидратированного осадка.

Осадитель ($NH_4H_2PO_4$) вводился в раствор в виде твердой соли. Осажденная фосфорнокислая соль тантала отстаивалась 10—12 час. и отфильтровывалась. Осадки во избежание гидролиза соли промывались смесью ацетон — вода (1 : 1) [4].

Результаты опытов по осаждению фосфорнокислых соединений тантала в растворах серной кислоты различной концентрации представлены в табл. 1.



Рис. 1. Рентгенограмма высушенной при 100°С фосфорнокислой соли тантала.



Рис. 2. Рентгенограмма прокаленной при 1000°С фосфорнокислой соли тантала.



Рис. 3. Рентгенограммы прокаленных соединений: 1 — ортофосфорной кислоты, 2 — фосфорнокислой соли тантала, 3 — пятиокиси тантала.

Определение состава фосфорнокислой соли тантала

В результате многочисленных анализов было установлено, что прокаленная фосфорнокислая соль тантала, полученная из растворов с невысоким содержанием серной кислоты (200—250 г/л), содержит, в среднем 13,67% P_2O_5 и 86,33% Ta_2O_5 , что приближается к теоретическому составу $2Ta_2O_5 \cdot P_2O_5$ (86,14% Ta_2O_5 и 13,86% P_2O_5). Результаты определения состава прокаленной фосфорнокислой соли тантала приведены в табл. 2. Фактически осадок фосфорнокислой соли тантала содержит несколько больше тантала и меньше фосфора, чем по формуле $2Ta_2O_5 \cdot P_2O_5$. Как соль, образованная слабым основанием, фосфорнокислая соль тантала в сильной степени подвергается гидролизу, что сопровождается понижением содержания фосфора в осадке. Повышение температуры практически не приводит к заметному усилению гидролиза соли.

Таблица 2

Опыт	Содержание в %	
	Ta_2O_5	P_2O_5
1	86,26	13,74
2	86,38	13,62
3	86,35	13,65
среднее	86,33	13,67

Чтобы выяснить, как влияет изменение количества осадителя на состав прокаленных осадков, полученных при высоком содержании серной кислоты в растворе, осаждение проводили при различных молярных отношениях $Ta_2O_5 : P_2O_5$. Кислотность раствора оставалась постоянной. Результаты опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Концентрация H_2SO_4 в растворе, г/л	Содержание в растворе, моль/л		Молярное отношение $Ta_2O_5 : P_2O_5$ в смеси	Содержание P_2O_5 в осадке, %	Отношение $Ta : P$ в осадке
	Ta_2O_5	P_2O_5			
220,5	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	1:5	13,74	2:1
220,5	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	1:10	13,65	2:1
220,5	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	1:25	13,70	2:1

Из табл. 3 видно, что при молярном отношении тантала к фосфору от 1 : 5 до 1 : 25 образуется фосфорнокислая соль тантала постоянного состава. Избыток осадителя не оказывает влияния на содержание фосфора в осадке.

Рентгенографическое исследование

Полученная фосфорнокислая соль тантала была подвергнута рентгенофазному исследованию* по методу порошков. Рентгенограммы получались на SiK_{α} -излучении в камере типа РКД с диаметром цилиндрической кассеты $D = 57,3$ мм. Положение линий на рентгенограммах определялось с точностью до 0,2 мм. Интенсивность линий оценивалась визуально. У высушенной при 20 и 100° соли кристаллическое строение не обнаружено. Прокаленная при 1000° фосфорнокислая соль тантала имеет кристаллическое строение. На рис. 1 и 2 показаны образцы рентгенограмм высушенной и прокаленной солей. Найденные межплоскостные расстояния в кристаллах соли $2Ta_2O_5 \cdot P_2O_5$ и интенсивность соответствующих линий на рентгенограмме указаны в табл. 4. В камере типа РКЭ производилась съемка прокаленных орто-

* Съемка проводилась сотрудником Института химии УФАН СССР С. И. Алямовским.

Таблица 4

Интенсивность I	Расстояние d, мк	Интенсивность I	Расстояние d, мк
Очень сильная	5,60	Средняя	1,492
>	4,20	Слабая	1,454
>	4,09	Средняя	1,391
>	3,85	>	1,326
Сильная	3,31	>	1,313
Слабая	3,24	>	1,288
Средняя	3,09	Слабая	1,240
Сильная	2,70	Средняя	1,197
Средняя	2,64	>	1,171
Сильная	2,47	>	1,126
Средняя	2,15	>	1,084
Сильная	1,93	>	1,006
>	1,84	Очень слабая	0,950
>	1,80	Средняя	0,924
>	1,78	>	0,889
>	1,70	Очень слабая	0,848
>	1,67	Слабая	0,827
Средняя	1,64	>	0,800
>	1,56		
Слабая	1,54		
Сильная	1,51		

фосфорной кислоты, фосфорнокислой соли тантала и пятиокси тантала. Образцы снимались в одних и тех же условиях. На рис. 3 даны рентгенограммы, показывающие, что соединения имеют различную кристаллическую решетку.

Выводы

1. Изучены условия осаждения фосфорнокислой соли тантала из сернокислых растворов. Показано, что эта соль количественно осаждается из растворов, содержащих серной кислоты до 1200 г/л.
2. Установлено, что состав прокаленной соли при кислотности раствора 200—250 г/л H_2SO_4 соответствует формуле $2Ta_2O_5 \cdot P_2O_5$. Избыток осадителя при молярном отношении $Ta_2O_5 : P_2O_5$ от 1 : 5 до 1 : 25 не оказывает влияния на состав осаждаемой соли.
3. Проведено рентгенографическое исследование полученных препаратов. Высушенная при 20 и 100° соль не имеет кристаллического строения, а прокаленная при 1000° переходит в кристаллическую форму.

Уральский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19/VIII 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Abegg, Handbuch der anorganischen Chemie, 111, 826, 831, 864 (1907).
2. Gmelin—Kraut's, Handbuch der anorganischen Chemie, 214, 286 (1912).
3. И. П. Алимари, Т. А. Бузова, Количественное разделение ниобия и тантала гипофосфитом натрия, ЖПХ, т. 18, вып. 6, 1945.
4. R. V. Nahn, Phosphates of Niobium and Tantalum. J. Amer. Chem. Soc., 73, 11, 5091 (1951).

Л. Ф. ВОЛКОВА

ТРОЙНАЯ СИСТЕМА ИЗ КАРБОНАТОВ ЛИТИЯ, НАТРИЯ И КАЛИЯ

В связи с изучением сложной взаимной системы из сульфатов и карбонатов лития, натрия и калия нами исследована тройная система из карбонатов этих элементов. Исследование показало, что карбонаты лития, натрия и калия в расплавах образуют комплексные соединения типа двойных солей.

Опыты проводились визуально-политермическим методом. Сплавы нагревались в платиновом тигле и при охлаждении перемешивались платиновой мешалкой до появления первых кристаллов в расплаве. Температура расплава при появлении первых кристаллов измерялась при помощи термопары платина—золото и гальванометра.

Исходные соли марки ХЧ перекристаллизовывались, температуры плавления чистых компонентов были приняты следующие: для Li_2CO_3 —732°, Na_2CO_3 —860°, K_2CO_3 —896°. Все составы выражены в молекулярных процентах.

Исследование данной системы было связано с большими трудностями, так как карбонаты лития, натрия и калия из расплавов кристаллизуются плохо, в некоторых участках системы расплав становился мутным, густым и часто наблюдалось переохлаждение, поэтому для определения температуры затвердевания сплавов требовалось внесение затравки.

Для составления полной диаграммы плавкости рассматриваемой системы были изучены три двойные системы и десять внутренних разрезов.

1. Система Li_2CO_3 — Na_2CO_3 исследована нами и Т. Ф. Шваб [1]; результаты в основном совпали. Эта система образует катионный комплекс состава Li_2CO_3 — Na_2CO_3 , явный максимум его — при 501°. Точки пересечения химического соединения с Li_2CO_3 и Na_2CO_3 —497° и 501° в интервале от 50,1 до 55,9% Li_2CO_3 . На кривой кристаллизации углекислого лития при 660° отмечено гомеоморфное превращение (см. табл. 1 и рис. 1).

2. Система Li_2CO_3 — K_2CO_3 исследована Т. Ф. Шваб [2] и нами, результаты исследований также совпали. Диаграмма ликвидуса системы состоит из трех ветвей кристаллизации: Li_2CO_3 и K_2CO_3 , пересекаемых ветвью химического соединения состава $Li_2CO_3 \cdot K_2CO_3$ с максимумом при 500°. Химическое соединение распространено в пределах от 37,5 до 60% K_2CO_3 , точки пересечения соответствуют 482° и 496° (см. табл. 1 и рис. 1).

3. Система Na_2CO_3 — K_2CO_3 изучена многими авторами: Аматори [3], Нигли, Н. С. Курнаковым, С. Ф. Жемчужным [4], исследование повторено нами. Система образует непрерывный ряд твердых растворов с минимумом 706° на кривой ликвидуса при 45% K_2CO_3 (табл. 1).

Для выяснения положения кривых совместной кристаллизации и местонахождения тройных точек было изучено 10 внутренних разрезов: девять из них расположены от стороны K_2CO_3 — Na_2CO_3 к вершине Li_2CO_3 , они определяют границы химических соединений, десятый — от стороны Li_2CO_3 — Na_2CO_3 к вершине K_2CO_3 .

Таблица I

Li ₂ CO ₃ — Na ₂ CO ₃				Li ₂ CO ₃ — K ₂ CO ₃				Na ₂ CO ₃ — K ₂ CO ₃	
% Li ₂ CO ₃	Температура, °C	% Li ₂ CO ₃	Температура, °C	% K ₂ CO ₃	Температура, °C	% K ₂ CO ₃	Температура, °C	% K ₂ CO ₃	Температура, °C
0	860	52,00	500	0	732	44,3	493	0	860
6,33	820	54,90	498	6,7	700	46,4	495	10	822
11,88	782	55,90	497	9,7	684	49,3	499	20	770
16,91	748	57,50	503	12,6	669	52,6	499	30	728
21,26	722	59,80	515	15,2	655	55	498	40	706
25,25	695	63,73	534	17,7	638	57,8	497	42,5	705
28,90	666	67,00	550	20,2	625	60	496	45	706
32,16	644	70,90	571	22,3	612	63,3	532	50	710
35,14	621	73,97	686	26,5	580	66	564	60	741
37,87	596	78,52	614	30,2	551	70	609	70	778
42,68	562	82,50	636	33,5	520	74,2	655	80	817
44,30	546	87,20	657	36,5	492	80	716	90	856
46,83	527	88,00	660	37,5	482	85,2	766	100	896
48,70	514	90,50	673	39,3	485	100	896	—	—
50,10	501	100	732	42	490	—	—	—	—

На основании изучения приведенных выше трех двойных систем, являющихся сторонами треугольника, и 10 внутренних разрезов составлена проекция диаграммы плавкости тройной системы из карбонатов лития, натрия и калия (рис. 1).

Катион лития является комплексобразователем, поэтому карбонатные системы щелочных металлов образуют соединения. Соединение Li₂CO₃ · K₂CO₃, образованное на боковой стороне, значительно вдается в глубь системы, а Li₂CO₃ · Na₂CO₃ только выклинивается, поэтому занимает незначительный участок ее.

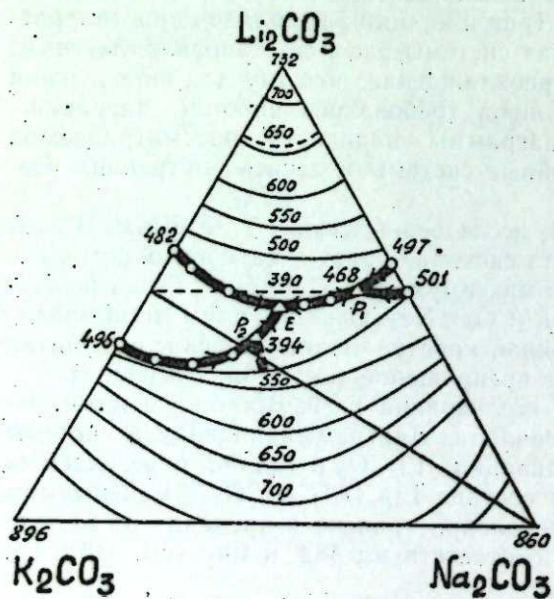


Рис. 1. Проекция политемпературной диаграммы плавкости тройной системы из карбонатов лития, натрия и калия.

3. Поле химического соединения Li₂CO₃ · K₂CO₃ — 9,55% общей площади.

4. Поле соединения Li₂CO₃ · Na₂CO₃ — всего 0,33%, так как оно выклинивается в точке 468°.

Триангуляционной секущей, выходящей из полюса соединения

Поверхность ликвидуса тройной системы имеет четыре поля кристаллизации.

1. Поле твердых растворов карбонатов натрия и калия занимает 67,54% общей площади треугольника. Твердые растворы претерпевают распад, направление которого — от политемпературной линии соединения Li₂CO₃ · K₂CO₃ к минимуму на стороне Na₂CO₃ — K₂CO₃.

2. Поле карбоната лития с гомеоморфным превращением тоже занимает значительную часть общей площади — 22,58%.

Li₂CO₃ · K₂CO₃ в сторону Na₂CO₃, система делится на два фазовых треугольника.

В системе Li, Na, K||CO₃ имеются три тройные точки: одна эвтектическая и две переходные. Эвтектическая точка E лежит в стыке трех полей кристаллизации: карбоната лития, соединения Li₂CO₃ · K₂CO₃ и твердых растворов карбонатов натрия и калия. Температура в этой точке 390° при составе 27,0% Li₂CO₃, 45% K₂CO₃ и 28% Na₂CO₃.

Переходная точка P₁ при 468° лежит на политемпературной линии, разграничивающей поле кристаллизации твердых растворов от Li₂CO₃. Состав сплава в точке 49,5% Li₂CO₃, 44,5% Na₂CO₃ и 6% K₂CO₃.

Переходная точка P₂ при 394° лежит на пересечении трех политемпературных линий, разграничивающих поле твердых растворов, Na₂CO₃ и соединения Li₂CO₃ · K₂CO₃. Состав сплава в точке P₂ 39% Li₂CO₃, 33,1% K₂CO₃ и 27,9% Na₂CO₃.

Выводы

1. Визуально-политемпературным методом изучена диаграмма плавкости тройной системы из карбонатов лития, натрия и калия.
2. Поверхность ликвидуса тройной системы имеет четыре поля кристаллизации: поле твердых растворов карбонатов натрия и калия, которое занимает наибольшую площадь, поле карбоната лития, поле соединения Li₂CO₃ · K₂CO₃ и поле соединения Li₂CO₃ · Na₂CO₃.
3. Система имеет одну тройную эвтектическую точку при 390° и две переходные при 468° и 394°.
4. Эвтектические сплавы исследуемой системы, имеющие невысокие температуры плавления, могут быть использованы в качестве соляных ванн для термической обработки металлов и в качестве сплавов-теплоносителей.

Иркутский сельскохозяйственный институт

Поступила в редакцию
11/VI 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Волков, Т. Ф. Шваб, Тройная взаимная система из фторидов и карбонатов лития и натрия. Изв. физ.-хим. н.-и. ин-та, т. 2, вып. 1, Иркутск, 1953.
2. Н. Н. Волков, Т. Ф. Шваб, Тройная взаимная система из фторидов и карбонатов лития и калия. Изв. физ.-хим. н.-и. ин-та, т. 2, вып. 1, Иркутск, 1953.
3. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин, т. 6, стр. 177, 192, М., 1931.
4. Н. С. Курнаков, С. Ф. Жемчужный, Двойная система Na₂CO₃ — K₂CO₃. ЖРХО, 1907.

Ф. Ф. БАРКОВА, Н. С. ЛИЛЕЕВ

КИНЕТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОГО КАРБОНАТА ЛИТИЯ С ХЛОРИСТЫМ АММОНИЕМ

Взаимодействие твердого карбоната лития с хлористым аммонием представляет интерес с практической стороны как возможный способ получения безводного хлорида лития в твердофазовой реакции и, кроме того, как случай такой топочимической реакции обмена, в которой один из компонентов — хлористый аммоний — способен сублимироваться. Сублимация заметна уже при температуре 100°, а при 332° приводит к полному переходу хлористого аммония в газообразное состояние, в котором он полностью диссоциирован на NH₃ и HCl.

Экспериментальная часть

Карбонат лития содержал 99,96% Li₂CO₃. После легкого растирания в фарфоровой ступке он был просеян через сито с 3600 отверстиями на 1 см² (150 меш).

Хлористый аммоний марки ХЧ содержал 98,98% NH₄Cl и был измельчен, как и карбонат лития.

При перемешивании влажной смеси карбоната лития с хлористым аммонием при комнатной t° чувствовался сильный запах аммиака, что указывало на начало реакции между компонентами смеси (в отсутствие влаги этого не наблюдалось.) Но без нагревания реакция протекала с очень малой скоростью, неприемлемой для практических целей.

Нами взаимодействие твердого карбоната лития с хлористым аммонием изучалось при температурах 200, 300, 400 и 500°.

Смесь реагирующих веществ, взятых в эквивалентных количествах (по 0,025 г-экв, т. е. 0,9250 г Li₂CO₃ и 1,3375 г NH₄Cl), помещалась в платиновую лодочку, которая вставлялась в фарфоровую трубку, нагреваемую до нужной температуры трубчатой печью. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, заключенной в стеклянный кожух и помещенной внутрь фарфоровой трубки.

Газообразные продукты реакции Li₂CO₃ + 2NH₄Cl = 2LiCl + 2NH₃ + CO₂ + H₂O, т. е. NH₃, CO₂ и пары воды, уносились из сферы реакции током воздуха, пропускавшегося из газометра со скоростью 5 л/час, в поглотительную склянку, где аммиак улавливался титрованным раствором соляной кислоты. Количество выделившегося аммиака позволяло судить о ходе реакции. Однако NH₃, CO₂ и пары воды при охлаждении образовывали углекислый аммоний, кристаллы которого оседали на стенках газоотводной трубки. Это затрудняло определение количества выделившегося аммиака. Более точные данные получены путем определения остатка карбоната, не вступившего в реакцию после определенно-го времени взаимодействия, методом обычного титрования кислотой.

Хлористый литий, полученный путем взаимодействия карбоната лития с хлористым аммонием при 200 и 300°, имеет вид порошка, при более высоких температурах — вид твердого мелкопористого и хрупкого конгломерата, легко извлекаемого из лодочки.

Средние результаты 3—4 опытов представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Степень взаимодействия и скорость реакции между карбонатом лития и хлористым аммонием в зависимости от температуры и длительности опыта (навеска Li₂CO₃ = 0,925 г)

Длительность реакции в мин.	Вес получ. продукта в г	Степень взаимодействия Li ₂ CO ₃		Скорость реакции $\frac{\Delta X}{\Delta t} \cdot 10^{-4}$	Константа скорости K
		в % к исходн. к-ву	в г-экв. X · 10 ⁻⁴		
При 200°С					
5	2,2031	7,75	19,3	3,86	0,02045
10	2,1265	14,62	36,5	3,44	
15	1,9807	25,72	63,4	5,38	
20	1,8476	36,44	91,2	5,56	
30	1,6855	53,56	134,7	4,35	
60	1,3967	75,2	188,0	1,81	
120	1,0586	90,65	227,6	0,64	
При 300°					
2	2,2393	10,51	26,2	13,1	0,1166
3	2,0470	24,04	60,1	33,9	
5	1,7629	43,68	109,34	24,6	
10	1,3230	80,93	202,0	18,5	
15	1,1080	95,36	237,8	7,16	
20	1,0430	96,15	240,0	0,4	
30	1,0410	96,18	240,3	0,03	
40	1,0422	96,25	240,6	0,06	
60	1,0448	97,64	243,9	0,16	
120	1,0443	97,18	243,7	—	
При 400°					
1	2,1623	20,00	50,26	50,3	0,2584
2	1,8574	42,03	104,4	54,4	
5	1,3668	76,96	192,3	29,2	
7	1,1325	91,03	227,4	17,5	
10	1,0366	93,57	223,5	2,0	
15	1,0454	96,64	241,5	1,7	
20	1,0378	97,33	243,5	0,3	
При 500°					
1	1,9446	34,10	85,2	85,2	0,6582
2	1,5444	65,28	163,3	78,1	
3	1,1957	88,38	222,0	57,7	
5	1,0360	97,04	243	11	
10	1,0356	97,04	243	—	

Приведенные данные свидетельствуют об очень большом влиянии температуры на процесс взаимодействия карбоната лития и хлористого аммония. Степень превращения, близкая 90%, при 200° достигается за 2 часа, при 300° — за 12 мин., при 400° — за 7 мин., при 500° — за 4 мин.

Эти цифры ярко показывают значение агрегатного состояния взаимодействующих веществ. Хлористый аммоний при 200° находится в твердом состоянии и лишь небольшая часть его переходит в газообразную диссоциированную форму. Степень взаимодействия при этой температуре сравнительно невелика. При 300° и выше весь хлористый аммоний переходит в газообразное состояние. Скорость реакции в интервале от 200 до 300° резко возрастает, при дальнейшем же повышении температуры до 400 и 500° ее изменение происходит значительно медленнее.

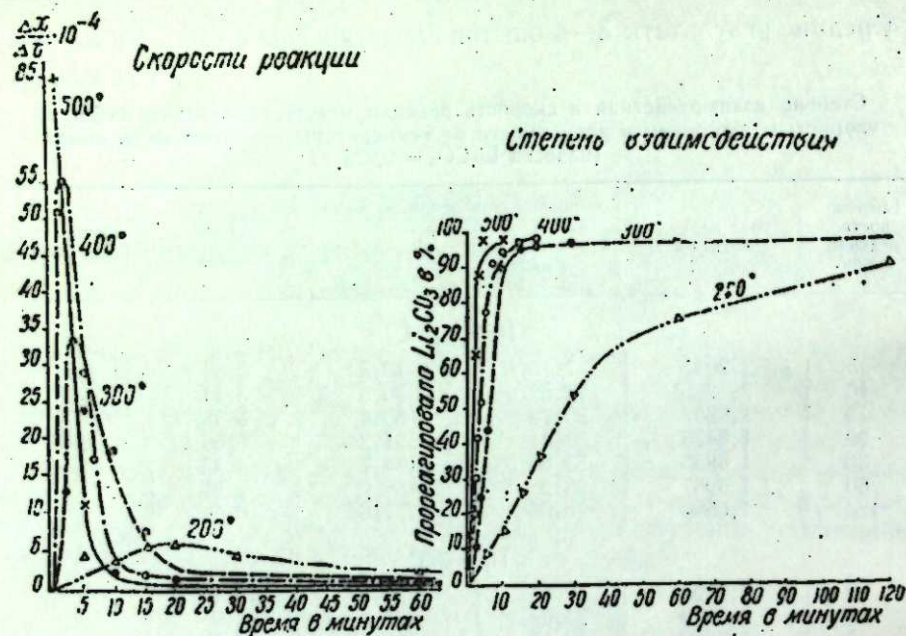


Рис. 1. Взаимодействие Li_2CO_3 с NH_4Cl ($\text{Li}_2\text{CO}_3 + 2\text{NH}_4\text{Cl} = 2\text{LiCl} + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

Температурные коэффициенты скорости этой реакции приведены в табл. 2.

Таблица 2
Температурные коэффициенты скорости реакции
 $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$

Интервал температур, °C	$\frac{K_{t+10}}{K_t}$	Увеличение скорости реакции
200—300	1,19	в 5,70 раза
300—400	1,08	2,2
400—500	1,10	2,5
200—500	1,12	32,0
300—500	1,09	5,5

Скорость реакции (см. рис. 1) при температурах 200, 300 и 400° с временем увеличивается, проходит через максимум, затем вновь уменьшается. Высота максимума и его положение зависят от температуры: с повышением ее максимальная скорость становится больше, а время достижения этой скорости уменьшается. При 500° реакция начинается с максимальной скоростью (при условии первого замера степени превращения через одну минуту взаимодействия).

При всех исследованных температурах количество карбоната, вступившего в реакцию до наступления максимума, равно примерно одной трети исходного (около 34%). Следовательно, максимальная скорость реакции между карбонатом лития и хлористым аммонием наступает, независимо от температуры, при одном и том же количестве прореагировавшего карбоната лития. Это можно объяснить тем, что изменение скорости реакции зависит от развития реакционной зоны, т. е. той части межфазовой поверхности, на которой локализован химический процесс. Максимальная скорость реакции соответствует наибольшей величине реакционной зоны, одинаковой для определенного вида реакции при разных температурах.

Константы скоростей реакции найдены по формуле для реакций первого порядка:

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a-x},$$

где t — время, мин.,

a — навеска карбоната лития, г,

x — количество превращенного карбоната лития, г.

Для каждой температуры в зависимости от длительности опыта получен ряд близких значений констант. Средние величины их приведены в табл. 1.

Откладывая на оси ординат логарифмы констант скоростей, а на оси абсцисс величины, обратные абсолютным температурам опыта, получаем зависимость констант скорости от температуры (рис. 2). Эта зависимость графически выражается линией, что соответствует закономерности, выведенной Вант-Гоффом и Аррениусом для гомогенных реакций. Тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс, умноженный на универсальную газовую постоянную, даст значение энергии активации:

$$E = \text{tg} \alpha \cdot R.$$

Энергия активации, вычисленная графическим методом, оказалась равной 8414 калориям. Кроме этого, энергия активации вычислялась по формуле

$$E = \frac{RT_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{K_2}{K_1},$$

что дало величину 8870 калорий.

Среднее значение энергии активации реакции взаимодействия карбоната лития с хлористым аммонием из двух величин, рассчитанных указанными путями, равно 8645 калориям.

Выводы

1. Изучена реакция взаимодействия твердого карбоната лития с хлористым аммонием при температурах 200, 300, 400 и 500°.
2. Показано влияние агрегатного состояния хлористого аммония на скорость реакции.
3. Вычислены температурные коэффициенты скоростей, константы скоростей и энергии активации данной реакции.
4. Установлено, что скорость реакции Li_2CO_3 с NH_4Cl находится в экспоненциальной зависимости от температуры.

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16/IX 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. C. C. Stephenson, The Dissatiation of chlorous ammonium. J. of Chem. Physics, 12, № 7, 1914.
2. J. W. Mellor, A comprehensive treatise on inorganic and theoretical chemistry, v. II, L., 1927.

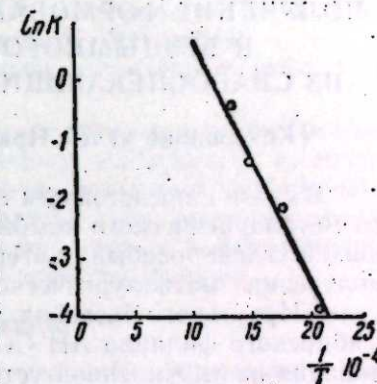


Рис. 2. Зависимость констант скорости от температуры.

А. Л. ПЕРЕПЕЛИЦА, А. С. ФЕДОТОВ

**ПОЛУЧЕНИЕ ФОРМОВАННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА
И БЕЗДЫМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА
ИЗ СЛАБОСПЕКАЮЩИХСЯ УГЛЕЙ ИРКУТСКОГО БАССЕЙНА**

(Коксование углей Иркутского бассейна по новой технологии)

В связи с предстоящим строительством в Иркутской области крупного металлургического комбината и отсутствием в этом районе коксующихся углей, особый интерес приобретает изыскание возможностей получения металлургического кокса из местных слабоспекающихся углей Иркутского бассейна. С этой целью в Отделе энергетики Восточно-Сибирского филиала АН СССР в 1954—1956 гг. были проведены исследования на укрупненной установке по коксованию углей Черемховского, Владимирского, Забитуйского и Новометелкинского месторождений по новой технологии коксования, разработанной в ИГИ АН СССР под руководством Л. М. Сапожникова.

Сущность новой технологии коксования, как известно [1], сводится к быстрому нагреву угля до пластического состояния, выдержке его, формованию, спеканию и прокатке изделий. При правильном для всех пяти стадий процесса технологическом режиме, соответствующем свойствам перерабатываемого угля, удается получить прочный металлургический кокс и формованное энергетическое топливо даже из слабоспекающихся углей.

Задачи и методика исследований

Основная задача исследований — установление принципиальной возможности получения металлургического кокса из слабоспекающихся углей Иркутского бассейна по новой технологии и определение выходов и качества получаемых при этом продуктов коксования.

В связи с отсутствием расходных показателей, необходимых для суждения об экономической целесообразности этого нового процесса при коксовании иркутских углей, была проведена серия балансовых опытов на укрупненной установке. Коксовались угли наиболее разведанных и перспективных угольных месторождений Иркутского бассейна: Черемховского (шахта № 7), Забитуйского, Владимирского и Новометелкинского (пробы 2, 3 и 4 из различных пластов).

Опыты проводились по следующей методике. Исходный уголь 0—3 мм с рабочей влажностью $W^p = 1,5—2\%$ непрерывно загружался в предварительно нагретую барабанную печь производительностью 30—40 кг/час, в которой нагревался до пластического состояния и выдавался из шнек-пресса в виде сплошного угольного стержня диаметром 60 мм. Этот стержень разрезался ножом на отдельные изделия длиной около 60 мм, которые сбрасывались в герметический ящик, а из него сразу же загружались в печь для спекания и прокатки. Количество и качество твердых, жидких и газообразных продуктов коксования, полу-

чаемых в установке с вращающейся печью и в печи прокаливания, замерялось и исследовалось отдельно. Применялась обычная методика: количество парогазообразных продуктов замерялось дроссельными приборами и объемным способом, твердых и жидких — взвешиванием, анализ газов проводился с помощью прибора ВТИ. Температуры в системе измерялись хромель-алюмелевыми термопарами.

Формованная масса загружалась в печь обжига и подвергалась процессу коксования по режиму, рекомендованному Л. М. Сапожниковым. Формованная масса и полученный из нее металлургический кокс испытывались на механическую прочность по методам К. И. Сыкова [2], И. Н. Николаева [3], Е. М. Тайца и В. К. Летовой [4].

Результаты испытаний систематизированы и сведены в табл. 1—8 (см. приложения).

Трудность точного количественного определения парогазообразных продуктов, выделяющихся из формовок в период выгрузки их из шнек-пресса и загрузки в прокаточную печь (из-за отсутствия необходимых измерительных приборов для замера количества газа, вытекающего из отверстий), заставляет полученные данные по низко- и высокотемпературной смоле и газам принимать пока как ориентировочные.

Обсуждение результатов

При всей тщательности подготовки условий формования нам не удалось стабильно получать из этих углей изделия с гладкой поверхностью. Каждый раз из насадки (ее диаметр 65 мм) выходили изделия диаметром 60 мм, причем поверхность их вследствие периодического закоксовывания насадки была шероховатой. Последнее сильно снижало механическую прочность угольных изделий, что влияло на качественные результаты испытаний.

Однако, несмотря на шероховатость поверхности формованных изделий, основная масса кускового материала имела достаточно высокую механическую прочность.

Кокс, полученный из небогатого угля шахты № 7, в опытах 4 и 7 представлял прочный монолит без видимых трещин. Испытания в барабане Николаева показали, что он имеет достаточную прочность, о чем свидетельствуют данные ситового анализа (табл. 7; это видно и на рис. 1). На долю коксовых кусков размером более 40 мм приходится в опыте 4 70,1%, в опыте 7 — 53,99%. Индекс прочности этих коксов (соответственно 5,33 и 7,17) также свидетельствует об их значительной механической прочности. Коэффициент газопроницаемости в обоих случаях достаточно высок.

Опыты 5 и 8 показали, что обогащение угля шахты № 7 существенно повлияло на его технологические свойства. Кокс был сильно трещиноват. Однако коксовые отдельные имели относительно высокую прочность (табл. 7). Коксовой мелочи было мало, основной процент кускового материала приходился на промежуточные фракции.

Для получения из обогащенного угля шахты № 7 прочного кокса без трещин следует в дальнейшем уточнить режимные температуры процессов прокатки и спекания изделий.

Опыт 11, проведенный с угольной смесью, состоящей из 90% угля шахты № 7 и 10% угля Новометелкинского месторождения (проба 4), показал следующее. Введение десятипроцентной добавки новометелкинского угля в качестве связующей присадки несколько снизило механическую прочность кокса. У полученного кокса были явные трещины, поэтому после 150 оборотов барабана количество кусков размером более 40 мм снизилось до 5,6% (табл. 7).

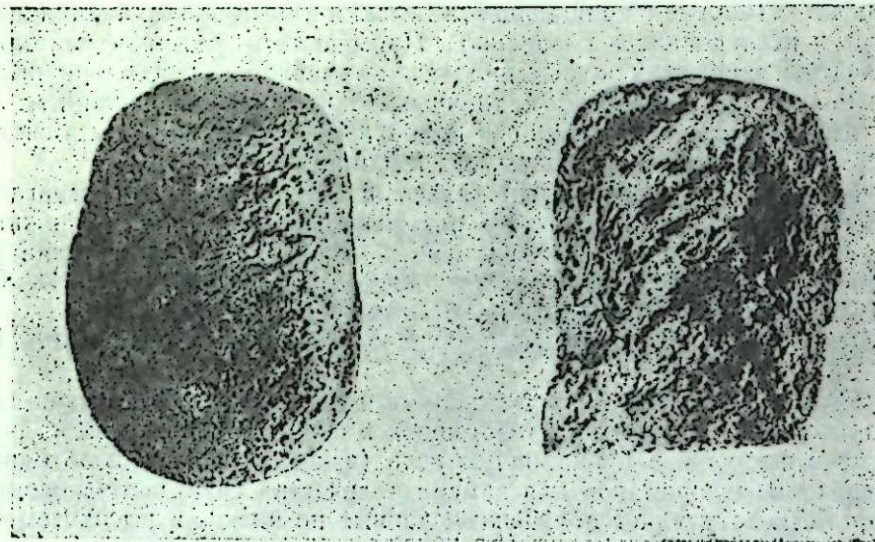


Рис. 1. Формованный кокс из черемховского угля после испытания в барабане — 150 оборотов (слева): структура кокса (справа).

Кокс из угля шахты «Забитуй» (опыт 9а) имел показатели, сравнимые с показателями коксов, полученных из углей шахты № 7.

Опыты 14а и 15а, проведенные на угле Новометелкинского месторождения (пробы 2 и 3), показали явную непригодность этого угля без смеси с другими давать металлургический кокс. Полученные из него коксовые изделия имели чрезвычайно пористую структуру и рассыпались даже при незначительных физических воздействиях. Пластическая масса этих углей отличается малой вязкостью. Получаемый расплав требует очень малого внешнего давления при формовании. Формованная масса, после снятия давления, увеличивается в объеме почти в два раза.

В процессе коксования содержание серы закономерно понижалось. В коксе, полученном из небогатенного и обогащенного углей шахты № 7, серы было соответственно 0,48% и 0,45% (опыты 4 и 8, табл. 3). Это вполне приемлемо для металлургического кокса.

В коксах из забитуйского и новометелкинских углей (опыты 9а, 14а и 15а, табл. 3) серы стало почти в два раза меньше, чем в исходном угле, но все же было больше, чем установлено кондициями.

Изменение количества серы в угле в процессе его термической обработки показано на рис. 2.

Содержание золы в коксе при коксовании обогащенного черемховского угля составляло в опытах 5 и 8 (табл. 3) соответственно 12,27 и 10,79%, что удовлетворяет кондициям металлургического кокса. Изменение зольности в процессе пирогенетического окисковывания черемховского угля представлено на рис. 3. Видно, что зольность кокса, полученного из обогащенного черемховского угля (опыт 22), вполне приемлема (8%):

Пористость кокса, полученного из черемховского угля, колебалась от 56,33 до 62,77% (табл. 7), что при правильном режиме коксования может удовлетворять требованиям, предъявляемым металлургическому коксу.

Содержание летучих веществ в коксе колебалось от 2,46 до 3,91%, что приемлемо для среднетемпературного коксования (табл. 3). Измене-

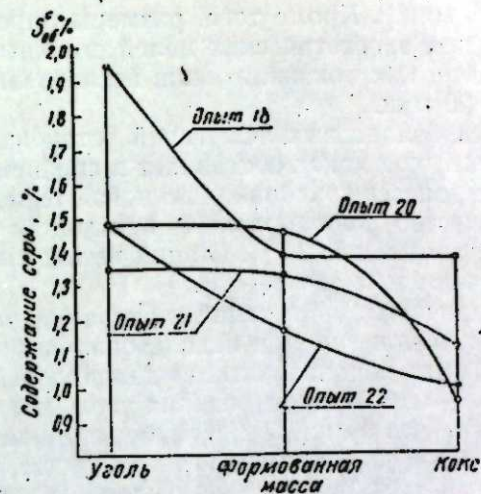


Рис. 2. Изменение содержания серы в процессе пирогенетического окисковывания угля.

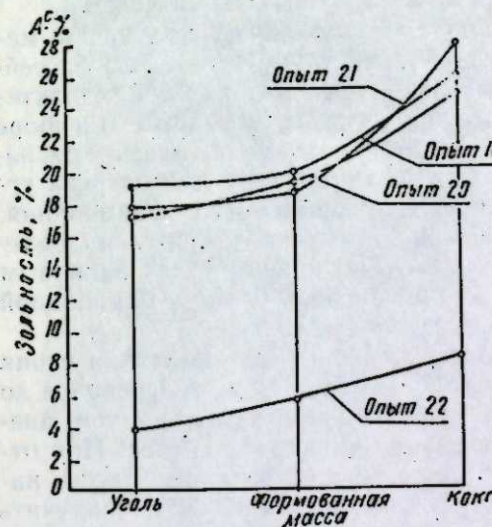


Рис. 3. Изменение зольности угольного вещества в процессе пирогенетического окисковывания угля. Опыт 22 — на обогащенном, опыты 18, 20 и 21 — на небогатенном черемховском угле.

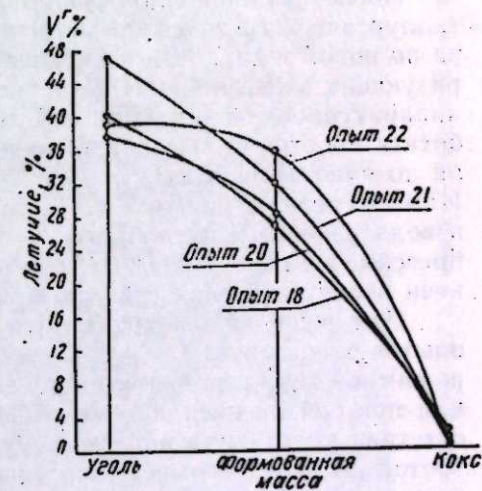


Рис. 4. Изменение содержания летучих веществ в процессе пирогенетического окисковывания угля.

ние их содержания в процессе пирогенетического окисковывания иркутских углей показано на рис. 4.

Полученная нами из черемховских углей формованная масса содержит еще значительное количество летучих, в среднем около 30%. Для получения бездымного энергетического топлива ее надо прокалить, чтобы содержание летучих веществ не превышало 18%. Недостаточную степень отгазованности формованной массы можно объяснить в основном быстрым нагревом угольных частиц и их кратковременным пребыванием в барабанной печи 5.

Сравнивая результаты испытаний механической прочности кокса и формованной массы, следует отметить, что по прочности последняя значительно слабее кокса. Поэтому она может быть использована в качестве энергетического топлива только после кратковременной про-

калки (примерно 15 мин.). Кроме того, размеры пирогенетически окисленного топлива для энергетических целей должны быть уменьшены до $d = 25-30$ м.к. Это, как показали наши исследования [6], уменьшает время прокали до 20 мин.

Результаты пяти балансовых испытаний установки сведены в табл. 8. Как видно из нее, выход кокса составляет в среднем 62% с колебанием от 59 до 63%. В процессе коксования по новой технологии выделяется значительное количество газообразных продуктов: швельгаза около 9—11%, коксового газа около 18%. Общий выход смолы из Иркутских углей достигает в среднем около 5—6%.

Результаты балансовых испытаний показали, что новый способ достаточно экономичен при условии использования всех продуктов коксования. Смолы должны использоваться для дальнейшей химической переработки, а фусы — для брикетирования угольной мелочи.

Следует отметить, что укрупненная лабораторная установка с вращающейся барабанной печью не моделирует будущей заводской, поэтому полученные нами средние значения выходов продуктов коксования углей Иркутского бассейна можно использовать в качестве ориентировочных при проектировании заводского оборудования, необходимого для промышленной проверки новой технологии коксования углей.

После установления принципиальной возможности получения металлургического кокса из слабоспекающихся углей Иркутского бассейна по новой технологии и определения расходных показателей, характеризующих экономичность этого нового процесса, встал вопрос о выборе аппаратного оформления его. В первую очередь необходимо разработать простую и высокопроизводительную аппаратуру для нагрева угля до пластического состояния и для последующего его формования. Нами в первом приближении изучены возможности замены малопродуктивного и неудобного в эксплуатации шнек-пресса валковым прессом, а также замены слоевого способа нагрева угля в барабанной печи более интенсивными — в «кипящем» слое и во взвеси.

Для решения первого вопроса была проведена специальная серия опытов с черемховским углем шахты № 7. Уголь 0—3 мм нагревался до режимной температуры в барабанной печи (до 400—410°), а затем шнеком при снятой насадке подавался в бункер валкового пресса. При отсутствии уплотнения или поджатия в шнек-прессе угольной массы, нагретой до температуры пластического состояния (~400°), получить монолитные брикеты в валковом прессе не удалось. Поэтому в дальнейшем применялось предварительное уплотнение угольной массы, нагретой до той же температуры, в прежнем шнек-прессе с насадкой. Полученная формованная масса цилиндрической формы подавалась на валковый пресс, в котором фактически повторно формовалась или брикетировалась.

Изготовленные брикеты в виде сплошной ленты чечевицы размером 60×40 мм, прокаленные по прежнему режиму, показаны на рис. 5.

Этими опытами указывается направление дальнейших исследований в области замены шнек-пресса валковым прессом. Подтверждается необходимость предварительного уплотнения пластической массы до поступления ее в валковый пресс, который имеет ячейки размером 60×40 мм.

Для заводской схемы, очевидно, можно рекомендовать обычные валки (без привода) для уплотнения и «прокатки» нагретой угольной массы перед поступлением ее в валковый пресс. Подача в валковый пресс сплошной угольной ленты определенной толщины обеспечивает получение плотных монолитов в виде чечевиц.



Рис. 5. Коксовые изделия, полученные в валковом прессе с предварительным уплотнением формованной массы.

Другим основным процессом технологической схемы новой техники коксования является нагрев угля до режимной температуры.

Для обеспечения регулируемого высокоинтенсивного нагрева угля до пластического состояния Отделом энергетики ВСФАН СССР в 1954—1955 гг. разработаны две схемы установок по новой технике коксования. В первой установке (рис. 6) нагрев угля осуществляется комбинированным способом в так называемой «печи-мельнице», а именно в «кипящем» слое и во взвеси — в потоке парогазового теплоносителя [7].

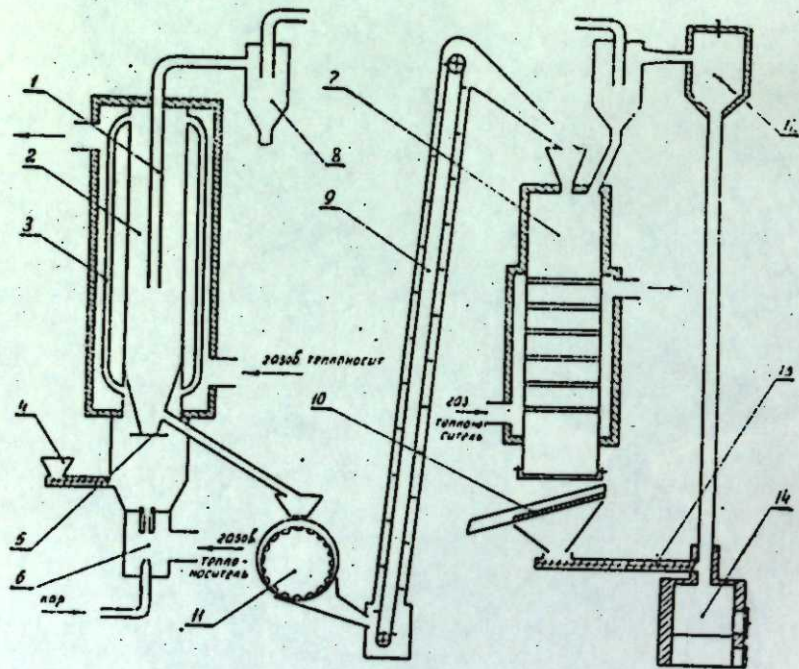


Рис. 6. Схема опытной установки для коксования и пирогенетического окусковывания углей с применением печи-мельницы системы ВСФАН СССР (производительность 10 т/сутки).

1 — отвод пылепарогазовой смеси, 2 — реактор, 3 — трубы реактора, 4 — топливный бункер, 5 — отбойная плита, 6 — эжекторная коробка, 7 — печь спекания и прокатки формовок, 8 — циклон, 9 — транспортер, 10 — грохот, 11 — кольцевой пресс, 12 — технологическая топка с кипящим слоем, 13 — шнек, 14 — топка.

В одном агрегате 5 совмещены также процессы кипения и дробления угля с целью интенсификации теплообмена. По этой схеме для окусковывания угля, т. е. для получения формованной массы, используется кольцевой пресс 11. Спекание и прокатка осуществляются в шахтной печи 7 с газовым и твердым теплоносителями. Последний вырабатывается в топке с кипящим слоем 12. Отделение готового окускованного топлива (брикетов) от коксовой мелочи — твердого теплоносителя осуществляется с помощью грохота 10.

Оригинальной частью этой схемы является первое звено — устройство для нагрева углей во взвешенном состоянии в парогазовой фазе (печь-мельница). Примененный пневморазмол позволяет в одной компактной установке объединить процессы измельчения угля и нагрева его до пластического состояния.

Потенциальная энергия пара используется, с одной стороны, для измельчения угля, с другой — для технологических целей (обессеривание

угля и увеличение выхода смолы) [8], поэтому применение пара целесообразно.

Сочетание печи-мельницы с кольцевым прессом обеспечивает высокую производительность установки.

По второй схеме (рис. 7) основной процесс — нагрев угля до пластического состояния — осуществляется по принципу «кипящего», или псевдооживленного, слоя. В качестве теплоносителя используется газовый или парогазовый поток. Установка позволяет одновременно сортировку угля на три фракции и высокоскоростной, причем регулируемый нагрев угля до режимной температуры. Самый крупный уголь и порода выпадают из потока вниз, а самая тонкая пыль (0—5 мм) уносится из сушилки 2 вверх — в циклон 4. Промежуточная фракция нагревается наиболее интенсивным способом — в кипящем, пульсирующе-вихревом потоке, обеспечивающем наибольшую интенсивность теплообмена, равномерность нагрева и точную регулировку процесса. В камере 6 происходит отгазовывание, глубина которого определяется длительностью выдержки угля, зависящей от частоты встряхивания и угла наклона грохота 7. Установка снабжена валковым прессом 10 для формования угольной массы.

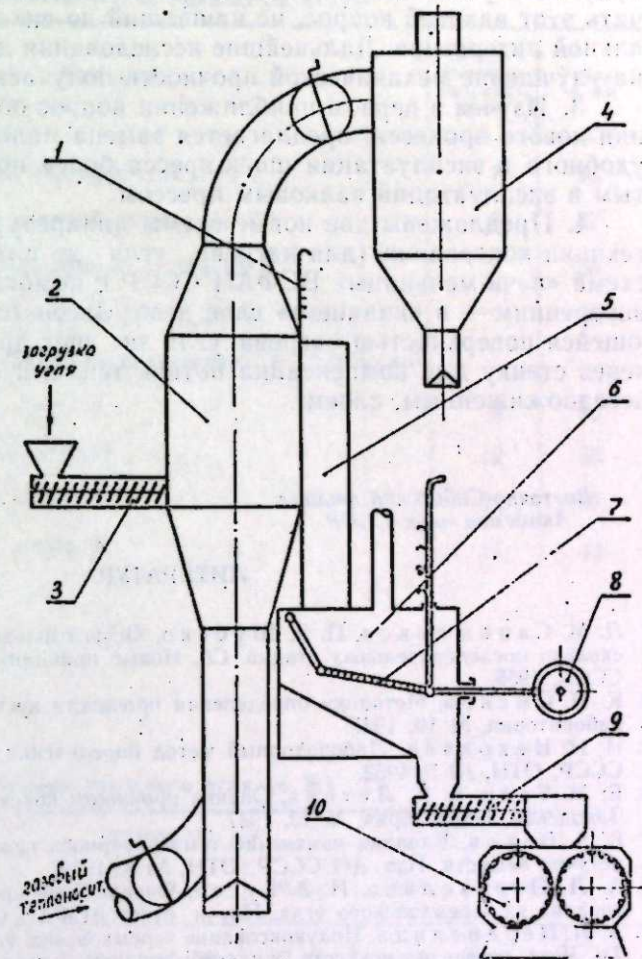


Рис. 7. Схема опытной установки ВСФАН СССР для пирогенетического окусковывания углей Восточной Сибири с применением «кипящего» слоя для сушки и нагрева угля до пластического состояния (производительность установки 25 т/сутки).

1 — шибер, 2 — сушилка (с «кипящим» слоем), 3, 9 — шнеки, 4 — циклон, 5 — перелив, 6 — камера выдержки, 7 — грохот, 8 — эксцентрик, 10 — валковый (ячеистый) пресс.

Установка снабжена валковым прессом 10 для формования угольной массы.

Выводы

1. Доказана принципиальная возможность применения разработанной ИГИ АН СССР новой технологии коксования для получения металлургического кокса и формованного энергетического топлива из слабо-спекающихся углей Иркутского бассейна, в частности из углей шахты № 7 Черемховского месторождения.

По содержанию летучих веществ, серы, по механической прочности,

пористости и крупности полученный из черемховских углей (шахта № 7) кокс удовлетворяет требованиям, предъявляемым к металлургическому коксу и бездымному энергетическому топливу.

2. Проведенные балансовые испытания установки при коксовании иркутских углей по новой технологии являются первой попыткой изучить этот важный вопрос, не нашедший до сих пор освещения в специальной литературе. Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение механической прочности получаемого кокса.

3. Изучен в первом приближении вопрос об аппаратном оформлении нового процесса: предлагается замена малопроизводительного и неудобного в эксплуатации шнек-пресса более производительным и простым в эксплуатации валковым прессом.

4. Предложены две новые схемы аппаратного оформления новой техники коксования (для нагрева угля до пластического состояния): схема «печи-мельницы» ВСФАН СССР с комбинированным нагревом — внутренним — в «кипящем» слое и во взвеси (с непрерывно увеличивающейся поверхностью нагрева угля за счет дробления) и внешним — через стенку для компенсации потерь тепла, и схема с «кипящим», или псевдооживленным, слоем.

Восточно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21/XI 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Сапожников, П. З. Шубеко, Осуществление процесса коксования в несколько последовательных стадий. Сб. Новые принципы коксования углей, Изд. АН СССР, 1955.
2. К. И. Сысков, Методика определения прочности кусковых материалов. Заводская лаборатория, № 10, 1947.
3. И. Н. Николаев, Лабораторный метод определения коксующести углей. Изв. АН СССР, ОТН, № 5, 1952.
4. Е. М. Тайц, В. К. Летова, Оценка прочности кокса по лабораторным образцам. Заводская лаборатория, № 10, 1947.
5. В. А. Вехов, Влияние изменения температурного режима на динамику изменения летучих веществ. Изв. АН СССР, ОТН, № 8, 1949.
6. А. Л. Перепелица, Н. З. Гусев, Определение времени нагрева формованного топлива из черемховского угля. Научн. отчет ВСФАН СССР, 1956.
7. А. Л. Перепелица, Полукоксование черемховских углей в пылевидном состоянии. Тр. Всес. совещ. по искусств. жидкому топливу и технологическим газам, ИГи АН СССР, 1957.
8. А. Л. Перепелица, Влияние пара на выход и состав продуктов полукоксования иркутских углей. Тр. ВСФАН СССР, вып. 9, 1956.

Таблица 1

Пластометрические показатели углей

№ опыта	Сорт угля	Толщина пластического слоя, у. м. м	Усадка, х. м. м
4	Черемховский необогащенный, шахта № 7	7	40
5	Черемховский обогащенный, шахта № 7	7	57
7	Черемховский необогащенный, шахта № 7	8	53
8	Черемховский обогащенный, шахта № 7	7	42
11	Шихта: 90% угля черемховского, шахта № 7, 10% новометелкинского, проба 4.	8	42
9a	Забитуйский необогащенный	12	36
14a	Новометелкинский, проба 2	22	37
15a	Новометелкинский, проба 3	11	48

Таблица 2

Ситовый состав исходного угля (в %)

№ опыта	Размеры сит, м. м						
	-3+1	0,417	0,208	0,147	0,104	0,074	-0,074
4	51,44	27,30	0,20	12,56	2,76	0,54	5,14
5	62,90	27,00	0,50	3,80	2,20	0,20	2,90
7	60,84	26,64	0,02	2,74	5,26	0,08	4,40
8	51,09	32,60	0,50	3,04	6,39	0,14	6,20

Таблица 3

Технический и элементарный состав угля, формованной массы и кокса

№ опыта	Дата	Продолжительность опыта, мин.	Наименование топлива	W/P	W/a	A ^a	V ²	S ^a _{об}	C ^a	H ^a	N ^a	O ^a	Калорийность
7	2 IV 1956 г.	86	Черемховский необогащенный уголь, шахта № 7	8,04	6,98	12,57	44,25	0,86	70,31	4,67	1,62	2,96	6241
4	12/III 1956 г.	45	Кокс	8,49	0,62	14,0	34,74	0,54	72,75	3,78	1,72	6,59	6548
5	13/IV 1956 г.	20	Черемховский необогащенный уголь	11,9	0,68	17,30	2,58	0,41	76,71	1,17	1,96	2,77	6850
8	5/VI 1956 г.	76	Формованная масса	7,14	5,56	16,50	46,34	0,60	63,70	4,46	1,31	7,87	5830
11	19/VI 1956 г.	44	Кокс	7,23	1,66	19,94	30,75	0,53	65,25	3,81	1,18	7,00	6000
9a	7/VI 1956 г.	84	Черемховский обогащенный уголь, шахта № 7	3,15	0,5	22,48	3,65	0,48	72,98	1,50	1,78	0,28	6750
14a	23/VI 1956 г.	80	Формованная масса	1,47	3,95	7,26	43,61	0,76	70,94	5,03	1,47	10,59	6150
15a	21/VI 1956 г.	75	Кокс	2,86	1,11	8,17	33,54	0,65	73,98	4,23	1,5	10,31	6457
			Черемховский обогащенный уголь, шахта № 7	7,14	1,12	12,27	3,91	0,58	80,39	2,32	1,84	1,48	7026
			Формованная масса	7,14	0,69	6,30	42,41	0,62	70,21	5,75	1,38	15,05	6249
			Кокс	7,23	1,40	7,21	30,55	0,50	73,09	4,82	1,52	11,46	6615
			Шихта: 90% угля шахты № 7, 10% номоделкин-ского, проба 4	7,23	0,81	10,79	2,46	0,45	84,70	1,22	1,63	0,40	7538
			Формованная масса	7,23	2,82	6,44	42,00	1,3	71,77	5,45	1,39	10,73	6326
			Кокс	7,23	1,54	7,00	33,77	0,88	75,07	4,28	1,29	9,14	6850
			Забитуйский уголь	3,15	1,17	9,09	3,40	0,60	84,20	2,12	1,20	1,62	7508
			Формованная масса	3,15	3,15	21,07	48,17	4,54	52,76	4,33	0,9	13,77	5773
			Кокс	1,47	0,56	23,85	36,08	4,43	54,55	4,13	1,05	11,68	6088
			Новометелкинский уголь, проба 2	1,47	0,46	31,33	3,30	2,69	59,30	4,23	1,23	0,41	6515
			Формованная масса	1,47	1,47	5,51	47,86	6,12	71,80	5,45	0,85	8,88	6647
			Кокс	2,86	0,84	5,92	40,96	5,90	77,85	5,27	0,97	3,31	7303
			Новометелкинский уголь, проба 3	2,86	0,47	10,07	2,98	3,18	80,30	4,07	1,13	0,85	7632
			Формованная масса	2,86	2,86	6,94	42,61	6,06	69,25	4,59	1,12	9,39	6360
			Кокс	2,86	0,71	7,55	34,31	5,62	71,55	4,39	1,19	9,07	6607
				2,86	0,61	11,57	2,72	3,22	78,50	4,13	1,32	0,77	7303

Состав компонентов швельгаза (в объемных %)

№ опыта	CO ₂ +H ₂ S	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	C _n H _{2n+2}	N ₂	Калорийность, Ккал/НМ ³
7	11,6	4,9	1,5	11,0	15,75	43,78	11,47	3063
8	15,20	3,10	4,40	9,45	24,77	24,55	18,53	2963
11	17,50	3,20	2,00	8,55	14,38	24,83	28,64	3300

Таблица 5

Состав компонентов коксового газа (в объемных %)

№ опыта	CO ₂ +H ₂ S	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	C _n H _{2n+2}	N ₂	Калорийность, Ккал/НМ ³
4	8,0	5,8	1,0	5,8	—	57,64	21,76	5096
5	9,7	0,2	1,8	7,1	10,90	19,30	51,00	4138
7	5,6	6,3	2,1	8,5	1,52	64,60	11,38	5897
8	7,80	2,05	4,45	3,55	11,29	28,23	42,63	5168
11	7,85	0,55	1,45	14,75	24,76	48,45	5,19	5232

Таблица 6

Оценка качества формованной массы

№ опыта	Ситовый состав в %				Г	П, кг-об/д.м ³	П _н , кг-об/д.м ³	П _д , кг-об/д.м ³	S _T , г.м ³ /кг	d ₀ , мм	d ₁₂ , мм
	>40 мм	>25 мм	>10 мм	<10 мм							
4	43,00	38,30	7,10	11,60	227	9,1	17,1	19,45	782	52	21,3
5	23,05	28,00	19,05	29,90	162	4,2	24,4	5,04	2975	42,4	12,05
7	18,37	50,52	15,97	15,14	189	6,15	20,4	8,82	1700	50,5	17,1
8	20,67	45,12	20,10	14,11	189	6,60	25,7	8,90	1685	50,0	17,5
11	35,10	33,97	21,95	8,98	214	9,17	19,9	17,0	881	49,8	21,5
9a	55,27	29,83	6,55	8,35	262	13,08	13,5	176,5	853	51,1	25,8
15a	0,00	64,03	18,25	17,72	174	6,52	7,23	66,3	226,2	36,7	15,26

Таблица 3

Технический и элементарный состав угля, формованной массы и кокса

№ опыта	Дата	Продолжительность опыта, мин.	Наименование топлива	W _P	W _a	A _d	V ₂	S _{об}	C _d	H _d	N _d	O _d	Калорийность, Ккал/кг
7	2 IV 1956 г.	86	Черемховский необогащенный уголь, шахта № 7	8,04	6,98	12,57	44,25	0,86	70,31	4,67	1,62	2,96	6241
			Формованная масса		0,62	14,0	34,74	0,54	72,75	3,78	1,72	6,59	6548
			Кокс		0,68	17,30	2,58	0,41	76,71	1,17	1,96	2,77	6850
4	12/III 1956 г.	45	Черемховский необогащенный уголь	8,49	5,56	16,50	46,34	0,60	63,70	4,46	1,31	7,87	5830
			Формованная масса		1,66	19,94	30,75	0,53	65,25	3,81	1,18	7,00	60,0
			Кокс		0,5	22,48	3,65	0,48	72,98	1,50	1,78	0,28	6750
5	13/IV 1956 г.	20	Черемховский обогащенный уголь, шахта № 7	11,9	3,95	7,26	43,61	0,76	70,94	5,03	1,47	10,59	6150
			Формованная масса		1,11	8,17	33,54	0,65	73,98	4,23	1,5	10,31	6457
			Кокс		1,12	12,27	3,91	0,58	80,39	2,32	1,84	1,48	7026
8	5/VI 1956 г.	76	Черемховский обогащенный уголь, шахта № 7	7,14	0,69	6,30	42,41	0,62	70,21	5,75	1,38	15,05	6249
			Формованная масса		1,40	7,21	30,55	0,50	73,09	4,82	1,52	11,46	6615
			Кокс		0,81	10,79	2,46	0,45	84,70	1,22	1,63	0,40	7538
11	19/VI 1956 г.	44	Шихта: 90% угля шахты № 7, 10% новометелкинского, проба 4	7,23	2,82	6,44	41,00	1,3	71,77	5,45	1,39	10,73	6325
			Формованная масса		1,54	7,00	33,77	0,88	75,07	4,28	1,29	9,14	6850
			Кокс		1,17	9,09	3,40	0,60	84,20	2,12	1,20	1,62	7508
9a	7/VI 1956 г.	84	Забитуйский уголь	3,15	3,15	21,07	48,17	4,54	52,76	4,33	0,9	13,77	5773
			Формованная масса		0,56	23,85	36,08	4,43	54,55	4,13	1,05	11,68	6088
			Кокс		0,46	31,33	3,30	2,69	59,30	4,23	1,23	0,41	6515
14a	23/VI 1956 г.	80	Новометелкинский уголь, проба 2	1,47	1,47	5,51	47,86	6,12	71,80	5,45	0,85	8,88	6647
			Формованная масса		0,81	5,92	40,96	5,90	77,85	5,27	0,97	3,31	7303
			Кокс		0,47	10,07	2,98	3,18	80,30	4,07	1,13	0,85	7632
15a	21/VI 1956 г.	75	Новометелкинский уголь, проба 3	2,86	2,86	6,94	42,61	6,06	69,25	4,59	1,12	9,39	6360
			Формованная масса		0,71	7,55	34,31	5,62	71,55	4,39	1,19	9,07	6607
			Кокс		0,61	11,57	2,72	3,22	78,50	4,13	1,32	0,77	7303

Состав компонентов шельгаза (в объемных %)

№ опыта	CO ₂ +H ₂ S	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	C _n H _{2n+2}	N ₂	Калорийность, Ккал/НМ ³
7	11,6	4,9	1,5	11,0	15,75	43,78	11,47	3063
8	15,20	3,10	4,40	9,45	24,77	24,55	18,53	2963
11	17,50	3,20	2,90	8,55	14,38	24,83	28,64	3300

Таблица 5

Состав компонентов коксового газа (в объемных %)

№ опыта	CO ₂ +H ₂ S	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	C _n H _{2n+2}	N ₂	Калорийность, Ккал/км ³
4	8,0	5,8	1,0	5,8	—	57,64	21,76	5096
5	9,7	0,2	1,8	7,1	10,90	19,30	51,00	4138
7	5,6	6,3	2,1	8,5	1,52	64,60	11,38	5897
8	7,80	2,05	4,45	3,55	11,29	28,23	42,63	5168
11	7,85	0,55	1,45	14,75	24,76	48,45	5,19	5232

Таблица 6

Оценка качества формованной массы

№ опыта	Ситовый состав в %				Г	Π ₁ , кг·об/дм ³	Π ₂ , кг·об/дм ³	Π ₃ , кг·об/дм ³	S _T , см ² /кг	d ₀ , мм	d ₁₂ , мм
	>40 мм	>25 мм	>10 мм	<10 мм							
4	43,00	38,30	7,10	11,60	227	9,1	17,1	19,45	782	52	21,3
5	23,05	28,00	19,05	29,90	162	4,2	24,4	5,04	2975	42,4	12,05
7	18,37	50,52	15,97	15,14	189	6,15	20,4	8,82	1700	50,5	17,1
8	20,67	45,12	20,10	14,11	189	6,60	25,7	8,90	1685	50,0	17,5
11	35,10	33,97	21,95	8,98	214	9,17	19,9	17,0	881	49,8	21,5
9a	55,27	29,83	6,55	8,35	262	13,08	13,5	176,5	853	51,1	25,8
15a	0,00	64,03	18,25	17,72	174	6,52	7,23	66,3	226,2	36,7	15,26

Таблица 7

№ опыта	Ситовый состав, %				Пористость, %	Г	П, кг·об/дм³	П _н , кг·об/дм³	П _о , кг·об/дм³	S _т , см²/кг	d ₀ , мм	d ₁₅₀ , мм
	>40 мм		>10 мм									
	>25 мм	>10 мм	<10 мм	<10 мм								
4	70,10	3,05	6,50	5,33	57,86	278	15,8	22,7	52	288	57,5	30,2
5	0,00	40,00	10,00	5,45	56,33	180	11,1	27,2	18,75	800	28	17,2
7	53,99	10,67	10,99	7,17	61,53	229	10,9	26,0	18,1	830	45	22,1
8	3,78	58,22	27,95	5,62	62,77	189	9,32	17,06	20,5	731	35,8	18,2
11	5,60	76,00	8,90	5,78	53,94	202	12,15	33,0	19,2	782	36,8	20,9
9a	13,05	80,60	4,33	7,80	—	231	27,31	46,16	67,1	223,5	35,5	26,9
14a	15,75	62,38	2,99	—	—	215	13,41	16,74	67,4	223,5	39,67	22,8
15a	26,85	40,67	1,50	—	—	169	4,14	4,83	28,97	517,7	46,39	12,4

Таблица 8
Выходы конечных продуктов коксования иркутских углей (на сухую массу в вес. %)

№ опыта	Кокс	Коксовый газ	Шельгаз	Скола и фум	Вода
4	61,56	19,46	10,00	5,12	3,86
5	63,55	16,82	10,72	4,68	4,23
7	62,00	16,40	11,50	6,21	3,89
8	61,65	20,90	9,14	4,99	3,32
11	59,32	18,50	11,40	6,34	4,44
Среднее	61,62	18,41	10,55	5,45	3,94
Пределы колебаний	59,32—63,55	16,40—20,90	9,14—11,50	4,68—6,34	3,32—4,44

Н. А. КУНИН
РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ
ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЕ

1. Метод моделирования на электролитической ванне благодаря простоте и достаточной для технических целей точности весьма широко применяется в самых различных областях техники. В основе его лежит сходство не между физическими явлениями, а между математическим аппаратом, описывающим исследуемое явление, и распределением потенциалов в электролитической ванне. Поэтому электролитическую ванну можно рассматривать просто как интегратор, предназначенный для решения определенного класса краевых задач.

Сначала мы остановимся на задаче нахождения функции двух переменных φ , удовлетворяющей безразмерному уравнению Пуассона

$$\nabla^2 \varphi = -\rho(x, y) \quad (1)$$

внутри замкнутой области S , при заданных на контуре области L значениях функции φ (первая граничная задача):

$$\varphi_L = q(l) \quad (2)$$

или ее нормальной производной (вторая граничная задача):

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)_L = r(l), \quad (3)$$

где l — длина дуги контура, отсчитываемая от произвольной точки.

Решение с помощью ванны конкретной задачи основано на возможности приведения к (1) с условиями (2) или (3) как исходного уравнения задачи, так и уравнения ванны.

Основное уравнение ванны, связывающее градиент потенциала u с объемной плотностью тока j ($a \cdot \text{см}^{-2}$) в электролите, выражается в форме дифференциального закона Ома:

$$\sigma \nabla u = -j, \quad (4)$$

где σ ($\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) — удельная электропроводность электролита. В дальнейшем более удобно будет трактовать электролит как бесконечно тонкую проводящую пластину с удельной поверхностной проводимостью σH_0 , где H_0 — толщина электролита. Закон Ома тогда примет вид:

$$\sigma H_0 \nabla u = -j, \quad (5)$$

где j ($a \cdot \text{см}^{-1}$) — уже поверхностная плотность тока. Взяв дивергенцию от обеих частей равенства и обозначив через i ($a \cdot \text{см}^{-1}$) поверхностную плотность источников тока, получим уравнение ванны в следующем виде:

$$\sigma H_0 \nabla^2 u = -i. \quad (6)$$

На границе области должно быть задано изменение по определен-

ному закону либо потенциала u (первая граничная задача), либо нормальной составляющей плотности тока j_n (вторая граничная задача), причем граница области ванны \tilde{L} должна быть геометрически подобна границе области L исходной задачи.

Пусть x_1, y_1 — координаты точки ванны, b (см) — коэффициент подобия, i_0 (а · см⁻²) — произвольный масштабный коэффициент. Произведя замену переменных

$$x_1 = bx, y_1 = by, i = i_0 \tilde{\rho}, u = \frac{b^2 i_0}{\sigma H_0} \tilde{\varphi}, \quad (7)$$

приведем (6) к виду

$$\nabla^2 \tilde{\varphi} = -\tilde{\rho}, \quad (8)$$

причем контур \tilde{L} преобразуется в L . Если теперь потребовать, чтобы выполнялось условие

$$\tilde{\rho} = \frac{i}{i_0} = \rho \quad (9)$$

и одно из граничных условий

$$\tilde{\varphi}_L = \frac{\sigma H_0}{b^2 i_0} u_L = q(l) \quad (10)$$

или

$$\left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial n} \right)_L = \frac{\sigma H_0}{b i_0} (\nabla_n u)_L = -\frac{1}{b i_0} (j_n)_L = r(l), \quad (11)$$

то преобразованные уравнения и граничные условия ванны будут тождественно совпадать с таковыми для исходной задачи, и, следовательно, для искомой функции $\varphi = \tilde{\varphi}$ получим выражение:

$$\varphi = \frac{\sigma H_0}{b^2 i_0} u. \quad (12)$$

Таким образом, решение задачи сводится к моделированию правой части исходного уравнения и граничных условий и к последующему измерению распределения потенциалов.

Если $\rho = 0$, то (1) превращается в уравнение Лапласа и решение задачи на ванне существенно упрощается. Моделированию уравнения Лапласа на электролитической ванне посвящена обширная литература, в которой подробно рассмотрены вопросы о применении метода конформных преобразований [1, 2], задании граничных условий [2—4], технике измерений [5, 6] и дан анализ различных факторов, влияющих на точность окончательных результатов [5].

Моделирование уравнения Пуассона, однако, сопряжено со значительно большими трудностями, и в литературе этот вопрос освещен совершенно недостаточно. Основное затруднение связано с моделированием правой части уравнения. Впервые эту задачу удовлетворительно решил А. Кингсбери [7] еще в 1931 г., но, по-видимому, его работа осталась малоизвестной, так как сравнительно недавно появились исследования [8, 9], в которых предлагаются менее удачные методы решения задачи.

Предложенный А. Кингсбери метод основан на следующей идее. Область S разбивается криволинейной, в общем случае, сеткой на ряд ячеек, и непрерывно распределенные источники тока заменяются рас-

положенными в центре каждой ячейки сосредоточенными источниками с токами, равными суммарному току ячейки. При достаточно малых размерах ячеек значения потенциалов в узловых точках сетки будут сколь угодно мало отличаться от тех значений, которые бы они имели при непрерывно распределенных источниках тока.

Если обозначить через s_{ik} площадь ячейки ванны, а через S_{ik} площадь соответствующей ячейки безразмерной области S , то для тока I_{ik} втекающего в ячейку, получим выражение:

$$I_{ik} = i_0 \tilde{s}_{ik} \tilde{\rho}_{ik}, \quad (13)$$

где $\tilde{\rho}_{ik}$ — среднее значение ρ в ячейке (для достаточно гладкой функции ρ — просто значение ρ в центре ячейки), $I_0 = i_0 b^2$ — произвольно выбранный базисный ток.

Значение функции φ в узловой точке будет определяться равенством:

$$\varphi_{ik} = \frac{\sigma H_0}{I_0} u_{ik}. \quad (14)$$

2. В качестве примера на рис. 1 приводится установка, которая была разработана и изготовлена под руководством автора на Новосибирском турбогенераторном заводе для моделирования подпятника гидрогенератора.

Для перехода от непрерывно распределенных источников тока к сосредоточенным на крышку ванны нанесена прямоугольная сетка, в узловых точках которой укреплены потенциальные электроды, а в центре ячеек — токовые. В качестве токовых и потенциальных электродов применялись латунные трубки диаметром 5 мм. Учитывая, что размер ячеек 50 × 50 мм, нарушение однородности электролита можно считать настолько малым, что им можно пренебречь.

Граничный контур моделируемой области в ванне состоит из отдельных пластин нержавеющей стали, разделенных изоляционными промежутками. На каждую пластину может быть подан либо потенциал

$$u_m = \frac{I_m}{\sigma H_0} q_m, \quad (15)$$

где q_m — среднее значение q на соответствующей дуге l_m контура L , либо ток

$$I_m = -i_0 b l_m r_m, \quad (16)$$

где l_m — длина электрода, r_m — среднее значение r на дуге l_m .

На рис. 2 показана принципиальная схема установки. В отличие от обычно принятых мостовых измерительных схем здесь все измерения осуществляются с помощью лампового вольтметра с достаточно высоким входным сопротивлением $R_{вх} = 2 \text{ мгом}$, чтобы пренебречь ответвляющимся в него током. Вольтметр специально градуировался на рабочей частоте 50 гц и после градуировки соответствовал прибору класса 1,0. Измерения в токовых цепях проводятся по падению напряжения на эталонных проволочных сопротивлениях $R_{эм} = 5000 \text{ ом}$, токи регулируются обычными радиотехническими потенциометрами. Для упрощения схемы токи в ванну пускаются группами по 24 тока. Потенциалы на всех потенциальных электродах измеряются отдельно для каждой группы токов, а затем суммируются. Схема предусматривает возможность моделировать функции ρ, q, r с учетом их знаков, что достигается изменением фазы приложенного напряжения.

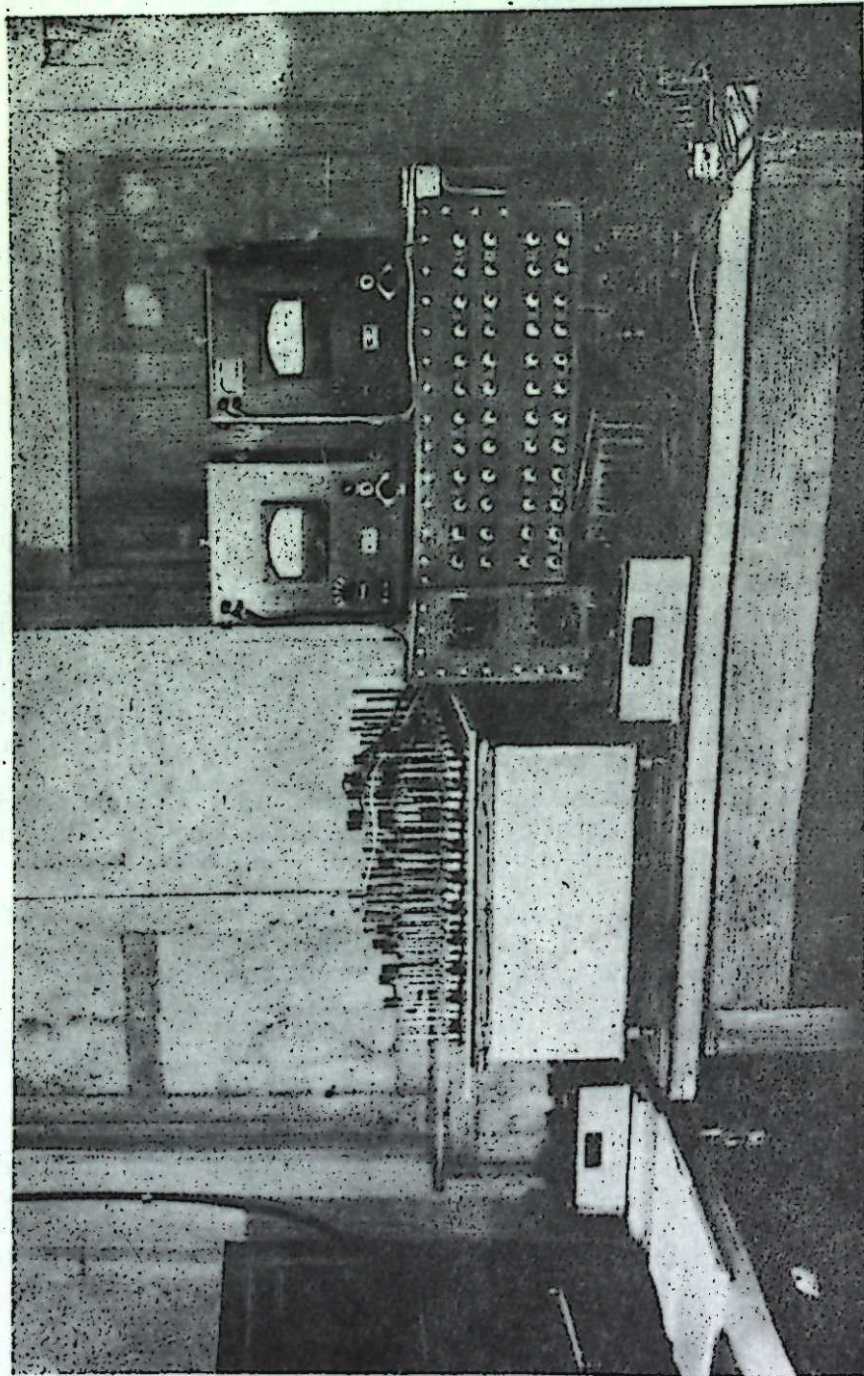


Рис. 1. Установка для моделирования уравнения типа Пуассона.

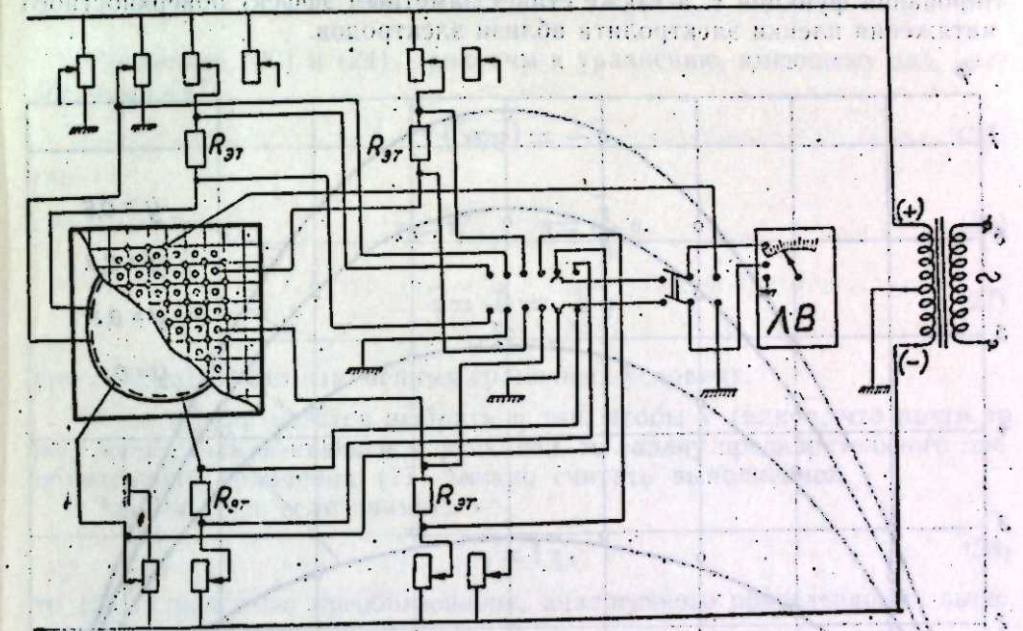


Рис. 2. Принципиальная схема установки для моделирования.

Чтобы оценить точность решения на электролитической ванне, был поставлен ряд контрольных опытов для тех случаев, когда точное решение известно. Так, например, моделировалось уравнение Пуассона с постоянной правой частью при однородных граничных условиях первого рода. На рис. 3 представлено точное решение и решение, полученное на ванне, для квадрата $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$. Средняя погрешность — менее 1% от максимального значения функции. В другой группе опытов за основу была принята хорошо известная для прямоугольника функция Грина оператора Лапласа [10]. В этих случаях в один из электродов пускали ток и замеряли потенциалы на других электродах. Средняя ошибка при этом была порядка 2%. Эти опыты позволили также независимо проконтролировать измерение электропроводности электролита, так как она измерялась в условиях, несколько отличных от рабочих.

3. Перейдем к моделированию более сложного уравнения:

$$\nabla(\nu \nabla \varphi) = -\rho, \quad (\nu > 0 \text{ в } S). \quad (17)$$

К этому уравнению приводятся, в частности, многие двумерные задачи распределения полей в неоднородных средах, а также трехмерные задачи с осевой симметрией.

Для решения на ванне уравнений (17) следует дополнительно моделировать функцию v переменной толщинной электролита H , полагая

$$H = H_0 v. \quad (18)$$

Однако в отличие от предыдущего случая уравнение ванны будет соответствовать (17) лишь приближенно, но тем точнее, чем меньше меняется функция v .

Для сильно меняющихся функций v имеет место и другой источник погрешности. Из-за ограниченной толщины электролита в этом случае неизбежно в отдельных местах слой электролита будет настолько тонким, что в таких местах резко понизится относительная точность моделирования функции v , а также станет заметным эффект поверхностного натяжения пленки электролита вблизи электродов.

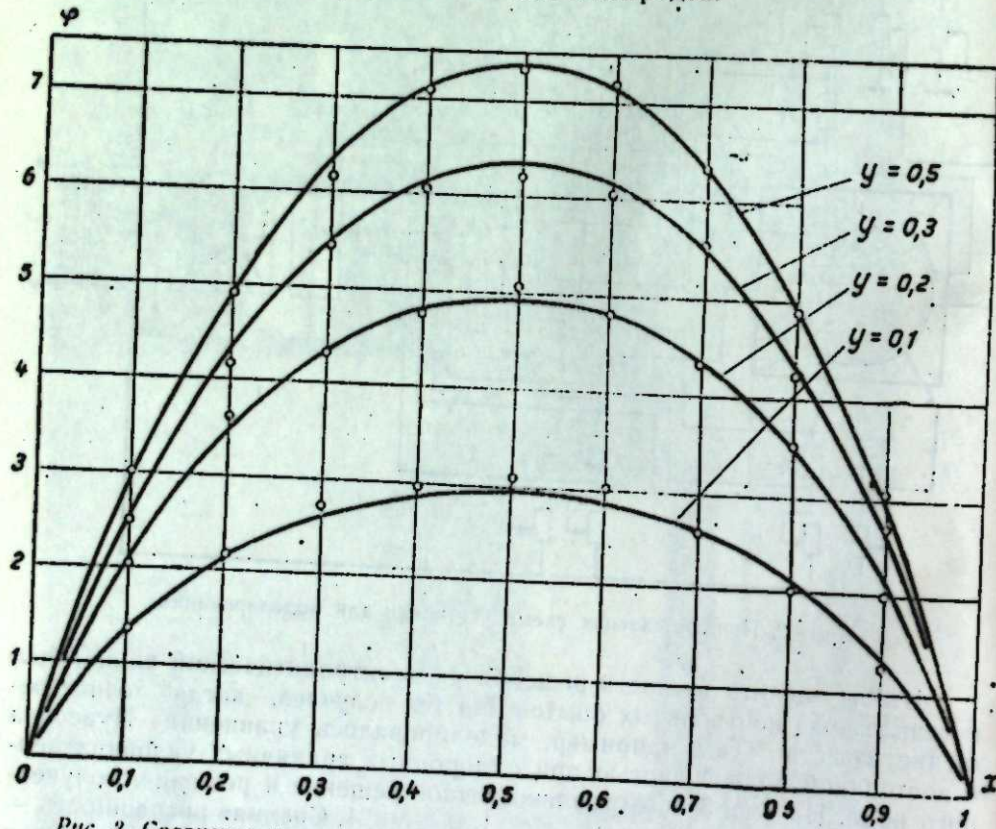


Рис. 3. Сравнение точного решения с решением, полученным моделированием.

Поэтому прежде, чем приступить к моделированию исходной задачи, целесообразно в ряде случаев предварительно преобразовать (17) в уравнение аналогичного вида, но с более гладкой функцией v . Рассмотрим метод такого преобразования.

Положим

$$\varphi = \frac{\psi}{\eta}, \quad \bar{v} = v. \quad (19)$$

Тогда нетрудно проверить, что (17) примет вид:

$$\eta \nabla^2 \varphi - \varphi \nabla^2 \eta = -\rho \quad (20)$$

или после деления на η :

$$\nabla^2 \varphi - \frac{\nabla^2 \eta}{\eta} \varphi = -\frac{\rho}{\eta}. \quad (21)$$

Пусть $\bar{\eta}$ есть какое-либо частное решение уравнения

$$\eta \nabla^2 \bar{\eta} - \bar{\eta} \nabla^2 \eta = 0. \quad (22)$$

Тогда

$$\nabla^2 \varphi - \frac{\nabla^2 \bar{\eta}}{\bar{\eta}} \varphi = -\frac{\rho}{\bar{\eta}} \quad (23)$$

или

$$\bar{\eta} \nabla^2 \varphi - \varphi \nabla^2 \bar{\eta} = -\frac{\bar{\eta}}{\eta} \rho. \quad (24)$$

Сравнивая (20) и (24), приходим к уравнению, имеющему вид, аналогичный (17):

$$\nabla(\bar{v} \nabla \varphi) = -\bar{\rho}, \quad (25)$$

где

$$\bar{v} = \bar{\eta}^2, \quad \bar{\rho} = \frac{\bar{\eta}}{\eta} \rho, \quad (26)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi}{\bar{\eta}} = \frac{\eta}{\bar{\eta}} \varphi \quad (27)$$

при соответственно измененных граничных условиях.

Если теперь удастся выбрать $\bar{\eta}$ так, чтобы \bar{v} (или $\bar{\eta}$, что почти тоже) была слабо меняющейся функцией, то задачу предварительного преобразования уравнения (17) можно считать выполненной.

Заметим, что если принять

$$\bar{\eta} = \xi \eta, \quad (28)$$

то (22) с помощью преобразования, аналогичного приведенному выше, приводится к виду:

$$\nabla(v \nabla \xi) = 0, \quad (29)$$

т. е. нахождение частного решения (22) равносильно нахождению частного решения однородного уравнения, соответствующего (17).

Укажем практически важный случай, когда можно сразу определить частное решение (29). Пусть

$$v = X(x) Y(y). \quad (30)$$

Тогда непосредственной подстановкой в (29) легко проверить, что

$$\xi = \int \frac{dx}{X} \int \frac{dy}{Y} \quad (31)$$

удовлетворяет (29).

Таким образом, для $\bar{\eta}$ можно принять выражение:

$$\bar{\eta} = \mu(c + \xi). \quad (32)$$

Постоянную c определим из условия минимума

$$I = \int_S (\nabla \bar{\eta})^2 dS, \quad (33)$$

что дает для c значение:

$$c \int_S (\nabla \eta)^2 dS = - \int_S \nabla \eta \nabla (\xi \eta) dS, \quad (34)$$

причем минимум всегда существует, так как

$$\frac{\partial I}{\partial c} = \int_S (\nabla \eta)^2 dS > 0. \quad (35)$$

4. В качестве примера рассмотрим основное уравнение гидродинамической теории смазки для прямоугольного ползуна [11]:

$$\nabla [(1 + \alpha x)^3 \nabla \varphi] = -\alpha, \quad (\alpha = \text{const}). \quad (36)$$

Частное решение однородного уравнения определим в виде

$$\xi = -2\alpha^2 \int \frac{dx}{(1 + \alpha x)^3} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha x)^2}. \quad (37)$$

Произведя элементарные вычисления по формуле (34), находим для c значение:

$$c = \frac{2 \ln(1 + \alpha)}{3(2 + \alpha)}. \quad (38)$$

Функции \bar{v} и $\bar{\rho}$ имеют вид:

$$\bar{v} \pm \frac{[\alpha + c(1 + \alpha x)]^2}{1 + \alpha x}, \quad (39)$$

$$\bar{\rho} = \alpha c + \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha x)^2}. \quad (40)$$

На рис. 4 представлены v и \bar{v} для $\alpha = 1$. Сравнение показывает, насколько эффективным оказывается в данном случае применение указанного выше преобразования.

5. В ряде случаев с помощью аналогичного преобразования можно осуществить моделирование на электролитической ванне задач, связанных с решением более широкого класса уравнений эллиптического типа

$$\nabla (v \nabla \varphi) - \mu \varphi = -\rho, \quad (41)$$

если известно какое-либо знакоопределенное, дважды дифференцируемое в S частное решение соответствующего однородного уравнения $\nabla (v \nabla \xi) - \mu \xi = 0$. (42)

Непосредственным вычислением нетрудно проверить, что уравнению (41) эквивалентно уравнение

$$\nabla (\bar{v} \nabla \bar{\varphi}) = -\bar{\rho}, \quad (43)$$

где

$$\bar{v} = \xi^2 v, \quad \bar{\rho} = \xi \rho, \quad \bar{\varphi} = \frac{\varphi}{\xi}. \quad (44)$$

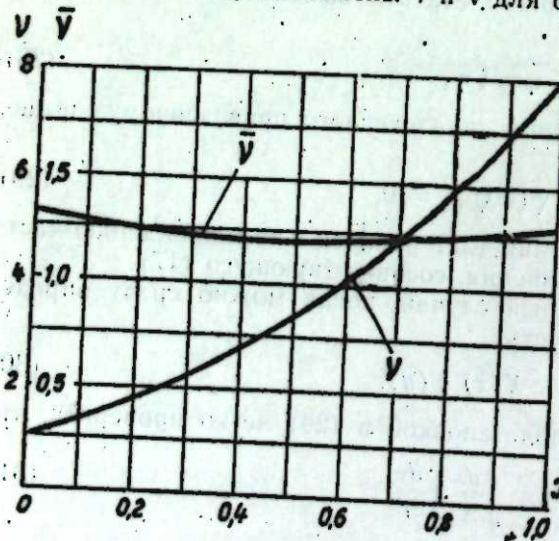


Рис. 4. Форма дна ванны до (v) и после (\bar{v}) преобразования.

В частности, например, если $\nu = 1$, $\mu = k^2 = \text{const}$ (уравнение стационарной диффузии при наличии распада и источников) и область S ограничена по координате x , то можно просто принять

$$\xi = e^{kx}, \quad (45)$$

и, следовательно, исходное уравнение примет вид:

$$\nabla [e^{2kx} \nabla (e^{-kx} \varphi)] = -e^{kx} \rho. \quad (46)$$

В случае необходимости его можно подвергнуть дальнейшему «сглаживанию».

В заключение отметим, что изложенные выше приемы преобразования исходных уравнений могут найти применение также при решении граничных задач на электронных счетных машинах.

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16/11 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. H. K. Farr, W. A. Keen, Improving Field Analogues by Transformations. El. Eng., vol. 74, 1955.
2. П. М. Егоров, Экспериментальное исследование потенциальных полей посредством конформно преобразованных моделей. Электричество, № 3, 1954.
3. А. В. Нетушил, Размеры контактных решеток при моделировании полей в электролитической ванне. Электричество, № 4, 1955.
4. М. М. Литвинов, Определение стационарных температурных полей в охлаждаемых турбинных лопатках и дисках методом электроанalogии. Изв. АН СССР, ОТН, № 5, 1956.
5. D. McDonald, The electrolytic analogue in the design of high-voltage power transformers. Proc. IEE, vol. 100, part II, 1953.
6. K. F. Sander, J. G. Yates, The accurate mapping of electric fields in an electrolytic tank. Proc. IEE, vol. 100, part II, 1953.
7. A. Kingsbury, On problems in the theory of fluid film lubrication with an experimental method of solution. Trans. ASME, vol. 53, 1931.
8. П. М. Егоров, Исследование вихревых магнитных полей в электролитической ванне. Электричество, № 6, 1955.
9. В. А. Карасев, Моделирование вихревого магнитного поля. Электричество, № 5, 1949.
10. Г. А. Гринберг, Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. Изд. АН СССР, М.—Л., 1948.
11. М. И. Яновский, Конструирование и расчет на прочность деталей паровых турбин. Изд. АН СССР, М.—Л., 1947.

М. С. ШАРЛОВСКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ
МЕТОДОМ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА

Взаимодействие твердых и газообразных веществ в кипящем слое за последнее время широко используется в ряде отраслей промышленности. Применение его позволяет осуществлять непрерывное ведение технологического процесса при однородном температурном режиме и хорошем контакте твердой и газообразной фаз. В результате процессы протекают более интенсивно, повышается качество продукции и значительно увеличивается производительность агрегатов.

Применение технологических процессов с кипящим слоем поставило задачу изучить теплообмен и массообмен как основные физические явления, происходящие при взаимодействии газового потока с твердым гранулированным материалом.

Исследованию теплообмена между газом и твердыми частицами в кипящем слое посвящен ряд работ советских и зарубежных исследователей [1—5]. Однако полученные результаты настолько разноречивы, что до сих пор не было возможности составить обобщенное представление о течении процесса и о влиянии отдельных факторов на интенсивность теплообмена. Значения коэффициента теплообмена при одинаковом критерии Re , по данным разных авторов, различаются в десятки раз. Причина расхождения — в различных методах исследования и обработки опытных данных. При этом самый главный источник расхождения и возможных неточностей — введение ряда допущений, обусловленных сложностью рассматриваемого явления. В частности, весьма различен и не всегда обоснован подход к определению температуры твердых частиц, не поддающейся непосредственному измерению.

Настоящая работа посвящена исследованию конвективного теплообмена между твердыми частицами и газовым потоком в кипящем слое. Критический разбор и обработка опытных данных, опубликованных по данному вопросу, позволили сопоставить результаты исследований различных авторов и объяснить причины существующих расхождений.

Метод определения коэффициента теплообмена

Сущность метода квазистационарного режима, впервые применяемого нами для определения коэффициента теплообмена в кипящем слое, заключается в создании таких условий, когда охлаждение частиц происходит в среде с линейным изменением температуры. Теоретическое решение задачи охлаждения тела при подобном режиме с соблюдением определенных начальных и граничных условий дает возможность получить зависимость между разностью температур частиц и газовой среды и влияющими на нее факторами. При этом средняя температура частичек определяется расчетным путем, исходя из начальных температурных условий и теплового баланса слоя с учетом теплообмена со стенками ка-

меры. Преимуществом указанного метода является то, что в любой момент в пределах квазистационарного режима коэффициент теплообмена определяется с одинаковой степенью точности, так как температура тела и температура среды изменяются по одному и тому же линейному закону, и, следовательно, разность между ними остается постоянной. Кроме того, этот метод дает возможность учитывать условия внутреннего прогрева твердых частиц, что является существенным, когда материал и размеры частиц не позволяют пренебрегать их термическим сопротивлением.

Поскольку естественное изменение температуры газа, охлаждающего кипящий слой, не является линейным, квазистационарный режим осуществляется искусственно на некотором отрезке времени с помощью регулирования темпа охлаждения.

Рассмотрим основные соотношения для случая теплообмена шара (принятая форма частиц), если последний охлаждается в среде, температура которой линейно изменяется со временем.

В задаче поставлены следующие начальные и граничные условия:

1. Температура охлаждаемого тела в начальный момент времени одинакова по всему объему и равна температуре среды:

$$t_{(r,0)} = t_0 = t_c \quad (1)$$

2. Граничные условия на поверхности охлаждаемого тела определяются из выражения:

$$\lambda_r \frac{\partial t_{(r,\tau)}}{\partial r} = \alpha (t_{(r,\tau)} - t_c) \quad (2)$$

где $t_{(r,\tau)}$ — температура поверхности шара в момент времени τ ,
 t_c — температура охлаждающей среды. В условиях равномерного режима охлаждения

$$t_c = t_0 - b\tau \quad (3)$$

где b — скорость охлаждения среды (град/час).

При условии $Fo = \frac{a\tau}{R^2} > 1$ наступает квазистационарный режим,

при котором начальное распределение температуры не влияет на течение процесса и температура в любой точке частицы изменяется по тому же линейному закону, что и температура среды. В этом случае выражение для температуры в некоторой точке объема шара на расстоянии радиуса r в момент времени τ при условии линейного закона изменения температуры охлаждающей среды имеет следующий вид [6]:

$$t_{(r,\tau)} = t_c + \frac{bR^2}{6a} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + \frac{bRC\gamma}{3a} \quad (4)$$

где a , C , γ — соответственно температуропроводность, теплоемкость и удельный вес материала,

R — радиус шара.

Температура поверхности шара определяется из выражения при $r = R$:

$$t_{(R,\tau)} = t_c + \frac{bRC\gamma}{3a} \quad (5)$$

откуда

$$\alpha = \frac{bRC\gamma}{3(t_{(R,\tau)} - t_c)} \quad (6)$$

Так как температура поверхности шара не может быть найдена экспери-

ментально, коэффициент теплообмена α следует выразить через среднюю температуру частиц, которая определяется расчетным путем из теплового баланса слоя. Средняя интегральная температура, по всему объему шара определяется из следующего выражения:

$$\bar{t} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 t(r,z) dr \quad (7)$$

Подставляя $t(r,z)$ из (3) в (6) под знак интеграла, получаем после интегрирования

$$\bar{t} = t_c + 0,0667 \frac{bR^2}{a} + \frac{bRC_1}{3} \frac{1}{a} \quad (8)$$

откуда

$$\alpha = \frac{bRC_1}{3(\bar{t} - t_c - 0,0667 \frac{bR^2}{a})} \quad (9)$$

Сравнивая знаменатели выражений (6) и (9), можно заключить, что разница между средней температурой частицы и температурой ее поверхности при охлаждении в квазистационарном режиме определяется следующей величиной, зависящей от внутреннего теплового сопротивления материала:

$$\bar{t} - t_{(R,z)} = 0,0667 \frac{bR^2}{a} \quad (10)$$

Из (10) видно, что при малом размере или большой теплопроводности частицы разность $\bar{t} - t_{(R,z)}$ становится настолько малой, что ею можно пренебречь. Тогда $\bar{t} \approx t_{(R,z)}$ и определение α проводится по упрощенной формуле (6).

Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой камеру 1 из асбоцементной трубы с внутренним диаметром 100 мм и высотой 800 мм. В месте соединения камеры с воздухоподводящим патрубком 13 установлена тонкая металлическая решетка 2, на которую засыпается слой зернистого материала. Воздух подается от компрессора через регулировочный вентиль 14, измерительную диафрагму 4 и электрический обогреватель 7. Обогреватель состоит из набора параллельно включенных спиралей, часть из которых включена в сеть через регулятор напряжения. Для получения заданного режима охлаждения температура воздуха регулируется путем изменения количества включенных спиралей (грубая регулировка), а также изменением напряжения (тонкая регулировка). Все температурные измерения осуществляются хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром электродов 0,2 мм. Измерение разности температур на входе в слой и выходе из него производилось дифференциальной термопарой, подключенной к гальванометру, цена делений которого в пересчете на градусы составляет 0,15—0,2°С. Один спай этой термопары 17 находится под решеткой вместе с термопарой 6, измеряющей температуру воздуха на входе в слой. Другой спай, 15, закрепленный на подвижном штативе 8, вводится в камеру сверху и может быть установлен в любом месте по высоте и по сечению слоя. Для определения теплообмена кипящего слоя со стенками камеры про-

изводилось измерение температуры стенок термопарами 9 на внутренней поверхности камеры и на глубине 5 мм от нее.

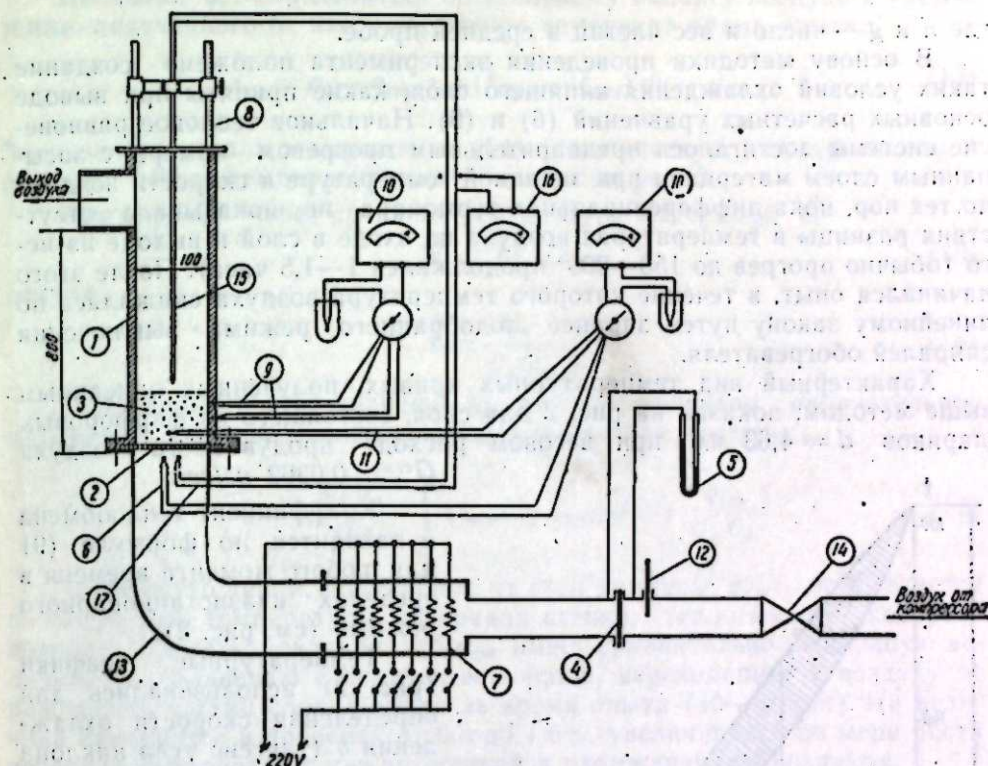


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — камера, 2 — решетка, 3 — слой зернистого материала, 4 — измерительная диафрагма, 5 — дифманометр, 6 — термопара, 7 — электрический обогреватель, 8 — подвижный штатив, 9 — термопара в стенке камеры, 10 — милливольтметры, 11 — термопара в слое, 12 — термометр, 13 — воздухоподводящий патрубок, 14 — регулировочный вентиль, 15 и 17 — соответственно верхний и нижний спаи дифференциальной термопары, 16 — зеркальный гальванометр.

Характеристика материалов, использованных для исследования теплообмена в кипящем слое, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика материалов, применявшихся в опытах

Материал	Форма частиц	Расчетный диаметр, мм	Удельный вес кг/м ³	Теплоемкость $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$
Фарфор	Круглая	2,1	2475	0,2129
		4,63	1996	0,210
		6,87	2072	0,2108
		8,9	1614	0,206
Кварцевый песок	Окатанная	0,832	2626	0,1815
		1,434	2412	0,1990
Мраморная крошка	Неопределенная	2,22	2412	0,1990
		3,01	2412	0,1990

Расчетный диаметр материала определялся как диаметр шара, имеющего объем, равный объему средней частицы, то есть

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{6g}{\pi \cdot n \cdot \gamma_m}} \quad (11)$$

где n и g — число и вес частиц в средней пробе.

В основу методики проведения эксперимента положено создание таких условий охлаждения кипящего слоя, какие приняты при выводе основных расчетных уравнений (6) и (9). Начальное тепловое равновесие системы достигалось предварительным прогревом камеры с засыпанным слоем материала при заданной температуре и скорости воздуха до тех пор, пока дифференциальная термомпара не показывала отсутствия разницы в температурах воздуха на входе в слой и выходе из него (обычно прогрев до 150—200° продолжался 1—1,5 часа). После этого начинался опыт, в течение которого температура воздуха снижалась по линейному закону путем заранее подобранного режима выключения спиралей обогревателя.

Характерный вид температурных кривых, полученных описанным выше методом, показан на рис. 2 для слоя, состоящего из фарфоровых шариков $d = 4,63$ мм при весовом расходе продуваемого воздуха $G_{сек} = 0,0362$ кг/сек.

Коэффициент теплообмена α находится по формуле (9) для любого момента времени в пределах квазистационарного режима (см. рис. 2).

Температурные графики (рис. 2) использовались для определения скорости охлаждения b (тангенс угла наклона температурной кривой) и температуры среды t_c , которую находили как среднее между температурами воздуха на входе в слой и выходе из него в момент времени τ :

$$t_c = \frac{t_{верх} + t_{низ}}{2} \quad (12)$$

Одна из больших трудностей при экспериментальном определении коэффициента теплообмена в кипящем слое — невозможность непосредственно измерить температуру твердых частиц. В настоящей работе эта температура определялась расчетным путем по количеству тепла Q_τ , аккумулированному в слое в момент времени τ . При этом сделано допущение, что благодаря интенсивному перемешиванию температура частиц в данный момент времени одинакова по всему объему слоя. Величина Q_τ представляет разность между количеством тепла $Q_0 = t_0 C_m G_m$, которое имел слой в начальный момент времени, и количеством тепла $q_{сл}$, которое он потерял при охлаждении воздухом за время от t_0 до τ :

$$Q_\tau = Q_0 - q_{сл} \quad (13)$$

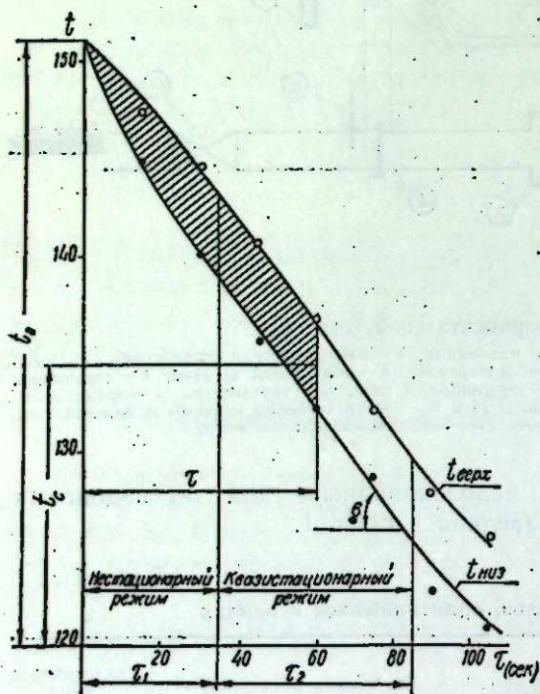


Рис. 2. Изменение температуры воздуха при квазистационарном режиме охлаждения кипящего слоя (фарфоровые шарики, $d = 4,63$; $h_{сл} = 60$ мм; $W\phi = 5,36$ (м/сек).

Величина $q_{сл}$ определяется по тепловому балансу воздуха с учетом тепла, полученного от нагретых стенок камеры за время опыта:

$$q_{сл} = q_0 - q_{ст} = \int_0^\tau (t_{верх} - t_{низ}) d\tau - q_{ст} \quad (14)$$

Значение интеграла в выражении (14) соответствует заштрихованной площади между температурными кривыми на рис. 2.

Выразим Q_τ через среднюю температуру материала \bar{t}_τ :

$$Q_\tau = \bar{t}_\tau C_m G_m \quad (15)$$

откуда

$$\bar{t}_\tau = \frac{Q_\tau}{C_m G_m} \quad (16)$$

Подставляя в (16) значение Q_τ из (13), получаем окончательное выражение для определения средней температуры частицы:

$$\bar{t}_\tau = t_0 \frac{C_0 G_0^{сек}}{C_m G_m} \int_0^\tau (t_{верх} - t_{низ}) d\tau + \frac{q_{ст}}{C_m G_m} \quad (17)$$

Количество тепла, получаемое от стен камеры, $q_{ст}$, определяется по изменению температуры материала стенки, теплоемкость которого известна. Расчеты показали, что $q_{ст}$ имеет сравнительно небольшую величину по сравнению с количеством тепла, переходящим к воздуху от разогретых частиц слоя. Обычно за время опыта (40—80 сек) эта величина изменяется в пределах от 0,3 до 1,6%, увеличиваясь по мере роста перепада температуры между стенкой и охлаждающим воздухом.

Для проверки правильности расчета по принятой методике коэффициента теплообмена величина его определялась для нескольких моментов времени в пределах квазистационарного режима одного опыта, где он должен быть постоянным. Отклонения, обусловленные степенью точности эксперимента, составляли от ± 8 до $\pm 10\%$. В качестве окончательного результата принималось среднее значение α .

Результаты исследования

Анализируя физические процессы, происходящие в кипящем слое, можно видеть, что на конвективный теплообмен между потоком и движущимися частицами оказывают влияние следующие основные факторы: 1) гидродинамические условия обтекания частиц, 2) физические свойства потока газа, 3) режим кипения, характеризуемый соотношением между подъемной силой потока и противодействующим ей весом частиц, составляющих слой, 4) геометрические размеры системы.

Критериальное уравнение теплообмена с учетом влияния этих факторов выражается в следующем виде:

$$Nu = f(Re, Pr, Ki, L) \quad (18)$$

Если в качестве газа применяется воздух, то критерий Pr является постоянной величиной и может быть исключен из уравнения.

За геометрический симплекс L обычно принимается отношение высоты слоя к диаметру частиц h/d .

Окончательный вид критериального уравнения с учетом вышесказанных соображений будет

$$Nu = CRe^n \cdot Ki^p \left(\frac{h}{d}\right)^m \quad (19)$$

$$Ki = d_s \sqrt[3]{\frac{4g}{3v^2} \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s} - 1\right)},$$

где d_s — эквивалентный диаметр частиц,

g — ускорение силы тяжести,

v — кинематическая вязкость воздуха,

γ_m, γ_s — соответственно удельный вес материала и воздуха.

Критерий Ki определяет равновесное состояние частицы в потоке и выводится из условий равенства подъемной силы потока и веса отдельной шарообразной частицы [7].

В критерии Re в качестве определяющей величины принята скорость фильтрации W_ϕ , рассчитанная на полное сечение камеры.

Рассмотрим влияние отдельных факторов на коэффициент теплообмена. В системе координат $Nu - Re_\phi$ нет однозначной зависимости между Nu и Re_ϕ , но возрастание интенсивности теплообмена с увеличением Re_ϕ очевидно (см. рис. 4). Результаты опытов с частицами из разных материалов и разных размеров дают группы точек, которые расположены в виде ступеней, так как пределы области кипящего слоя по критерию Re_ϕ для них различны. Угол наклона этих групп неодинаков и уменьшается с ростом Re_ϕ . Пределы изменения показателя степени n при Re_ϕ получены следующие: при Re_ϕ от 35 до 300 $n = 0,88$; при Re_ϕ от 300 до 2500 $n = 0,62$.

Сравнительно меньшее влияние скорости фильтрации на теплообмен в зоне высоких скоростей согласуется с теорией существования двух фаз в кипящем слое [8, 4]. Согласно этой теории, первая («непрерывная») фаза состоит из основного газового потока с равномерно распределенными в нем движущимися частицами, а вторая («периодическая») представляет собой прорывающиеся через слой газопузыри. Эти пузыри соприкасаются с движущимися частицами только своей поверхностью, и поэтому газ, находящийся в них, принимает ограниченное участие в теплообмене.

Специальными исследованиями и многочисленными визуальными наблюдениями [8] доказано, что с увеличением скорости увеличивается доля газа, составляющая «периодическую» фазу. Поэтому в зоне больших скоростей она влияет на теплообмен менее эффективно, чем в зоне низких, где почти все количество проходящего газа активно участвует в теплообмене.

Исследование влияния высоты слоя на теплообмен проводилось в следующих пределах изменения h/d : для фарфоровых шариков $d = 4,63; 6,87$ и $8,9$ мм — от 8 до 16 и для кварцевого песка $d = 0,832$ мм — от 40 до 90. Результаты опытов показали, что при крупных частицах (малые h/d) изменение высоты их слоя оказывает значительно меньшее влияние на теплообмен, чем тогда, когда слой состоит из меньших частиц (песок). В опытах с кварцевым песком отчетливо выражается обратная зависимость между Nu и h/d : показатель степени при h/d $m = -0,65$. Средний показатель степени m для всех серий опытов принят равным 0,45. Обратная зависимость между Nu и h/d наблюдалась и в опытах И. М. Федорова [1], исследовавшего теплообмен в кипящем слое для влажного материала, причем он предложил показатель степени при h/d $m = -0,34$. Различие его данных с нашими объясняется тем, что И. М. Федоров проводил опыты при малых h/d , а в таком случае, как уже указывалось, этот симплекс влияет на теплообмен менее значительно.

Увеличение интенсивности теплообмена при уменьшении высоты слоя происходит, вероятно, благодаря тому, что в слое малой высоты контакт твердых частиц с газовым потоком осуществляется более полно, так как, при прочих равных условиях, в этом случае количество газовых пузырей и их размеры меньше, чем в высоком слое.

Критерий Ki изменялся в опытах от 27 до 294. Увеличение критерия Ki характеризуемого при одинаковых параметрах воздуха размером и весом частиц, способствует увеличению коэффициента теплообмена. Причиной является то, что при неизменной скорости фильтрации в слое, состоящем из более крупных и тяжелых частиц, относительная скорость воздуха больше, чем в слое из меньших частиц, которые стремятся двигаться вместе с воздушным потоком.

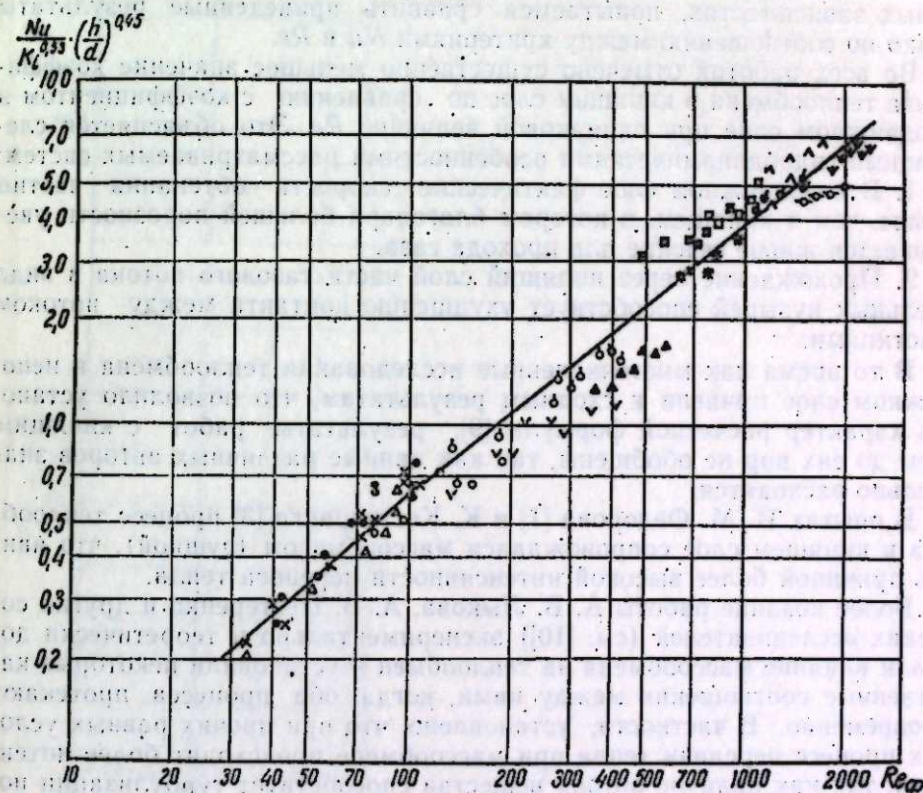


Рис. 3. Опыты по теплообмену в кипящем слое (обозначения см. в подписи к рис. 4).

На рис. 3 результаты опытов представлены в координатах $\frac{Nu}{Ki^{0,53}}$

и Re_ϕ в логарифмическом анаморфозе. Как видно из графика,

опытные точки удовлетворительно расположены на логарифмических прямых, которые представляют следующие зависимости: для Re_ϕ от 30 до 120

$$Nu = 0,0097 \cdot Re \cdot Ki^{0,53} \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,45} \quad (20)$$

для Re_ϕ от 120 до 2200

$$Nu = 0,015 \cdot Re^{0,805} Ki^{0,53} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,45} \quad (21a)$$

Наибольшее отклонение опытных точек от экспериментальных кри-

вых, выражаемых уравнениями (20) и (21 а) ($\pm 30\%$), — наблюдается в опытах с частицами неправильной формы (мрамор). В опытах с шарообразными частицами среднее отклонение составляет не более 15%.

Сравнение результатов

Экспериментальное исследование конвективного теплообмена между газовым потоком и твердыми частицами проводилось советскими и иностранными исследователями. Результаты этих исследований в сравнении с нашими данными приведены в табл. 2.

Не рассматривая подробно влияние на теплообмен всех факторов, различно представленных в предлагаемых исследователями критериальных зависимостях, попытаемся сравнить приведенные результаты только по соотношению между критериями Nu и Re .

Во всех работах отмечено существенно меньшее значение коэффициента теплообмена в кипящем слое по сравнению с коэффициентом в неподвижном слое при одинаковой величине Re . Это объясняется следующими гидродинамическими особенностями рассматриваемых систем:

1. В неподвижном слое фактические скорости обтекания частиц больше, чем в кипящем, в котором благодаря большей порозности увеличивается живое сечение для прохода газа.

2. Прохождение через кипящий слой части газового потока в виде отдельных пузырей способствует ухудшению контакта между потоком и частицами.

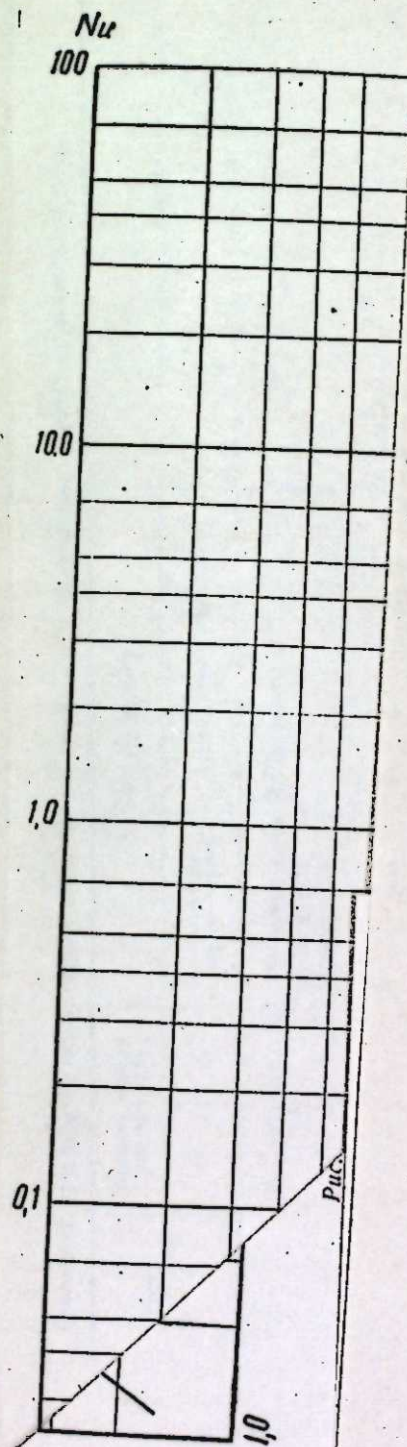
В то время как многочисленные исследования теплообмена в неподвижном слое привели к сходным результатам, что позволило установить характер расчетной формулы [9], результаты работ с кипящим слоем до сих пор не обобщены, так как данные различных авторов значительно расходятся.

В опытах И. М. Федорова [1] и К. Кеттенринга [3] процесс теплообмена в кипящем слое сопровождался массообменом (сушкой), что явилось причиной более высокой интенсивности переноса тепла.

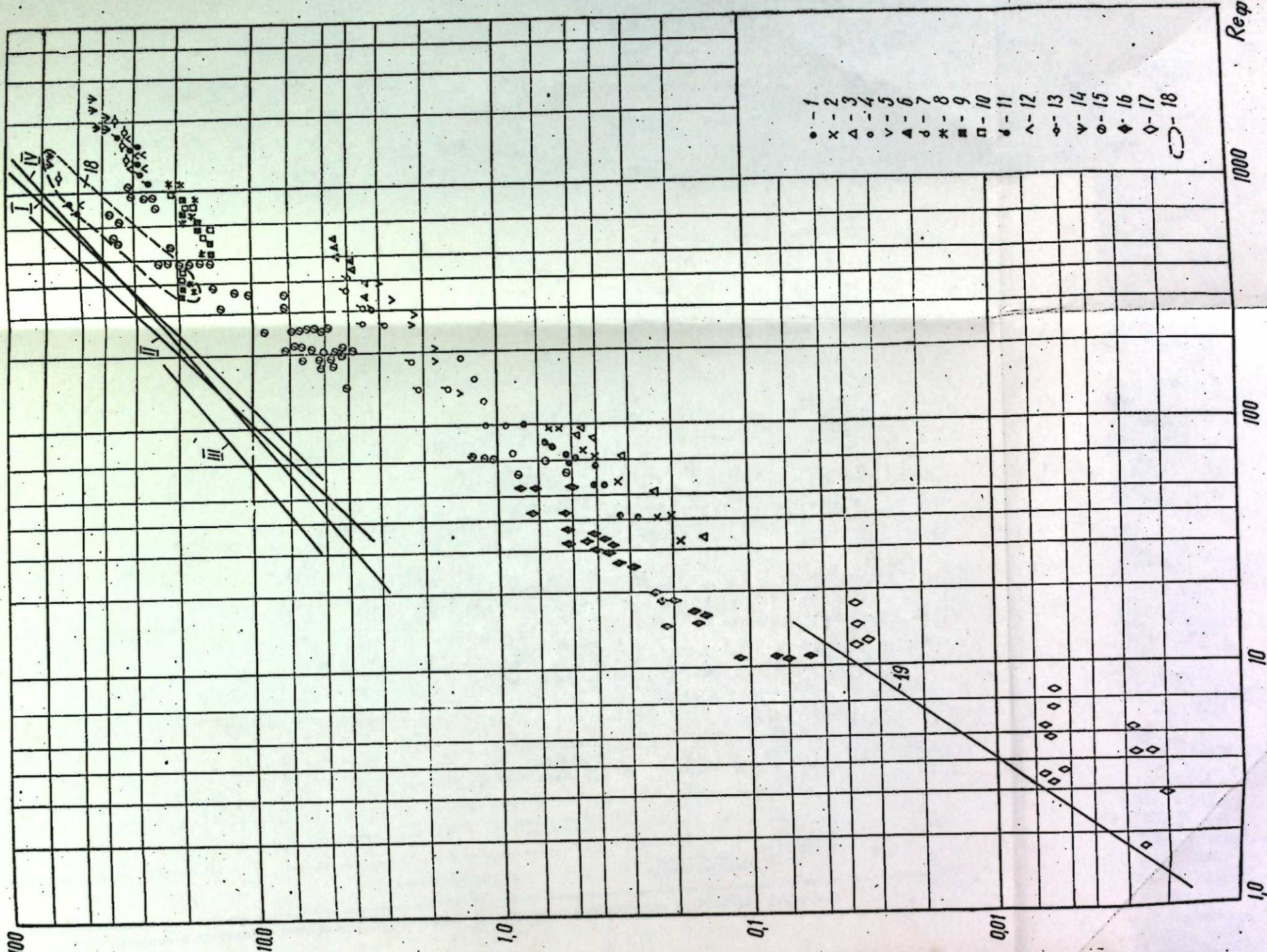
Более поздние работы А. В. Лыкова, А. В. Нестеренко и других советских исследователей (см. [10]) экспериментально и теоретически доказали влияние массообмена на теплообмен и установили некоторые качественные соотношения между ними, когда оба процесса протекают одновременно. В частности, установлено, что при прочих равных условиях процесс передачи тепла при массообмене происходит более интенсивно, так как наличие потока вещества способствует турбулизации пограничного слоя и усиливает молекулярный перенос тепла. Влияние массообмена предложено учитывать критерием, который характеризует отношение теплового потенциала массообмена, эквивалентного разности температур между сухим и мокрым термометрами ($t_c - t_m$), к потенциалу теплообмена, эквивалентного величине t_c , то есть

$$\frac{t_c - t_m}{t_c}$$

Исследования Ф. М. Полонской (см. [10]) показали, что в период постоянной скорости сушки, когда влажность не меняется, показатель степени при Re остается таким же, как и для «сухого» теплообмена, но в зависимости от относительной влажности воздуха изменяется множитель пропорциональности в критериальном уравнении. Согласно расчетам Ф. М. Полонской, величина коэффициента теплообмена при наличии влагообмена примерно на 30% больше, чем для «сухого» теплообмена, при прочих равных условиях. На графике (рис. 4) опытные точки



№



1000 Reφ

100

10

10

Рис. 4. Сводный график по теплообмену в кипящем и неподвижном слоях.

Кипящий слой. Опты автора: 1, 2, 3 — песок, $d = 0,832$, $h_{сд} = 40, 60$ и 80 мм; 4, 5, 6 — мраморная крошка, $d = 1,431$, $h = 40, d = 2,2$, $h = 62$, $d = 3,01$, $h = 84$; 7 — фарфоровые шарики, $d = 2,1$, $h = 45$; 8, 9, 10 — фарфоровые шарики, $d = 4,63$, $h = 40, 60, 80$; 11, 12 — фарфоровые шарики, $d = 6,87$, $h = 84$ и 110 ; 13, 14 — фарфоровые шарики, $d = 8,9$, $h = 96$ и 148 ; 18 — переходная зона. Опты И. М. Федорова: 15 — уголь, картон, $d = 0,5-1,0$. Опты К. Кеттеринга: 15 — силикатная пыль, $d = 0,25-0,5$; Опты У. Валсли: 17 — стеклянные шарики, $d = 0,1-1,0$. Опты Н. А. Шахова: 19 — кварцевый песок, $d = 0,25-0,5$; 17 — 2,67. Неподвижный слой. I — опты В. А. Шахова, II — опты О. Саллерса, III — опты И. М. Федорова, IV — опты З. Ф. Чуханова и Е. А. Шапатовой.

Сравнение результатов исследований теплообмена между газом и твердыми частицами в кипящем слое

Автор	Материал частиц, их диаметр, мм	Пределы измерения критерия		Методы определения		Предложенное критериальное уравнение
		Re	Nu	температуры твердых частиц	коэффициента теплообмена	
И. М. Федоров [1]	Древесный и подмосковный уголь, картон; 0,5—10	25—2000	0,5—50	По температуре мокрого термометра	По скорости сушки	$Nu = 0,0151 \cdot K_t^{0,74} \cdot Re^{0,64} \cdot (h/d)^{-0,34}$
К. Кеттинг [3]	Силикагель, глинозем; 0,4—1	6—60	0,27—25	По температуре газа на выходе из слоя	По скорости сушки	$Nu = 0,0135 \cdot Re^{1,3}$
Дж. Валтон [4]	Уголь; 0,3—0,8	6—50	0,3—7	По температуре газа на выходе из слоя	По углу наклона кривой $\ln(t_w - t_s) = f(L)$ (L—высота слоя)	$Nu = 0,028 \cdot Re^{1,7} (d/D)^{-0,2}$
Н. А. Шахова [2]	Кварцевый песок; 0,25—0,5	1,4—9,5	0,0035—0,0094	Измерение температуры при прекращении продувания слоя	Решение задачи нестационарного теплообмена	$Nu = 0,353 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{1,55} \cdot W^{-1}$ (W—число псевдооживления)
У. Вамслей [5]	Стеклянные шарики, глинозем; 0,1—1,0	1,77—18	0,002—0,004	Расчет по тепловому балансу слоя	По углу наклона кривой $\ln(t_{вх} - t_{внх}) = f(\tau)$	Формулы нет
М. С. Шардовская (данная работа)	Кварцевый песок, фарфоровые шарики, мрамор; 0,832—8,9	30—120 120—2500	0,14—45	Расчет по тепловому балансу слоя То же	Решение задачи на охлаждение тела в квазистационарном режиме То же	$Nu = 0,0097 \cdot Re \cdot K_t^{0,53} (h/d)^{-0,45}$ $Nu = 0,015 \cdot Re^{0,865} \cdot K_t^{0,53} \cdot (h/d)^{-0,45}$

И. М. Федорова располагаются несколько выше наших, что объясняется влиянием массообмена на интенсивность переноса тепла. При уменьшении коэффициента теплообмена на 30% результаты И. М. Федорова хорошо совпадают с нашими данными.

В методике обработки опытных данных, приведенной К. Кеттенрингом [3], вызывает возражения отсутствие учета влияния массообмена и неверное определение температуры твердых частиц, которая принимается равной температуре воздуха в верхней части слоя. Автор объясняет последнее тем, что при отсутствии тепловых потерь и достаточной высоте слоя в его верхней части температура становится постоянной благодаря тепловому равновесию с частицами. Однако в дальнейшем специально поставленные измерения [5] показали, что температура частиц отличается от температуры воздуха внутри кипящего слоя. Последняя к тому же может быть не везде одинаковой благодаря двухфазному состоянию воздушного потока. Для периода постоянной скорости сушки, в течение которого происходит теплообмен в опытах К. Кеттенринга, более справедливо считать температуру частиц равной температуре мокрого термометра на выходе газа, как это делает И. М. Федоров и ряд других исследователей массообмена. Учитывая это, при пересчете опытных данных К. Кеттенринга за температуру твердого тела была принята температура мокрого термометра. В результате такого пересчета значения коэффициента теплообмена, предложенные К. Кеттенрингом, уменьшились в 4—6 раз. На сводном графике (рис. 4) области опытных точек К. Кеттенринга и И. М. Федорова совпали, располагаясь несколько выше нашей благодаря влиянию массообмена.

Дж. Валтон [4] проводил исследования при стационарном режиме теплообмена в кипящем слое сухого материала. При определении коэффициента теплообмена за температуру твердых частиц принималась температура газа на выходе (нижний предел) и температура, показываемая оголенным спаем термопары, вставленной в слой (верхний предел). Соответственно были получены максимальное и минимальное значения коэффициента теплообмена для нескольких участков по высоте слоя. Как уже было доказано на примере опытов К. Кеттенринга, предположение о равенстве температуры частиц и температуры воздуха на выходе из кипящего слоя является ошибочным и рассчитанные на этом основании коэффициенты теплообмена имеют завышенное значение. Отсутствие сведений о действительной температуре твердых частиц в опытах Дж. Валтона не позволило произвести корректировку его опытных данных, и поэтому на сводном графике эти данные не представлены. Опытные точки Валтона попадают в область изменения критерия Re для неподвижного слоя, что подтверждает завышенное значение коэффициента теплообмена в этих опытах.

Опыты Н. А. Шаховой [2] и У. Вамслея [5] проводились при меньших значениях критерия Re , чем во всех других исследованиях, рассмотренных выше (см. табл. 2). Н. А. Шахова определяла коэффициент теплообмена путем последовательных приближений, принимая за исходные данные температуру частиц, замеряемую термопарой в слое при мгновенном прекращении продувания воздуха. Этот метод можно считать удовлетворительным только для таких мелких частиц, какие использовала Н. А. Шахова, когда осевший слой имеет достаточную плотность и обеспечивает хороший контакт между частицами и королюком термопары. Экстраполяция кривой, построенной по уравнению Н. А. Шаховой для близкого к нашим значениям числа псевдооживления ($W = 2,67$), удовлетворительно совпадает с областью наших опытных точек.

Результаты, приведенные У. Вамслеем [5], отличаются от результа-

тов других исследований тем, что автор при изучении теплообмена в кипящем слое не обнаружил влияния скорости. Очевидно, методика расчета и точность проведения опытов (нестационарный процесс) обладали погрешностями, которые помешали выявить эту закономерность, несомненно существующую при любом характере движения газа и частиц. Общий порядок величин, полученных У. Вамслеем, таков, что его опытные точки в координатах Nu и Re_{ϕ} располагаются там же, где и опытные точки Н. А. Шаховой.

Более высокая интенсивность теплообмена в неподвижном слое, чем в кипящем, заставляет предполагать существование переходной области, в которой по мере изменения гидродинамических условий одна закономерность теплообмена переходит в другую. Для выяснения этого вопроса проводились специальные опыты с фарфоровыми шариками, причем коэффициент теплообмена определялся в режиме перехода слоя в состояние кипения. Результаты показали, что в этом случае значение α выше, чем при наступлении активного кипения, несмотря на более низкие скорости фильтрации. Это явление согласуется с физической сущностью процесса, если принять во внимание, что в области перехода действительная скорость обтекания частиц уменьшается с ростом скорости фильтрации благодаря резкому увеличению порозности в начальный период кипения. Опытные точки, полученные при исследовании теплообмена в зоне перехода слоя из неподвижного в кипящее состояние располагаются на сводном графике (рис. 4) между кривыми для неподвижного слоя и областью опытных точек для кипящего слоя. Снижение эффективности теплообмена при наступлении активного кипения необходимо учитывать при выборе режима кипящего слоя. Чтобы теплообмен в кипящем слое происходил не менее интенсивно, чем в неподвижном, количество продуваемого газа должно обеспечивать кипение за пределами переходной области.

Выводы

1. Впервые проведено изучение теплообмена в кипящем слое методом квазистационарного режима. Преимуществами указанного метода являются отсутствие влияния начальных условий, одинаковая точность результатов в любой момент течения процесса и возможность учета внутреннего теплового сопротивления материала.
2. Получены расчетные зависимости для определения коэффициента теплообмена в кипящем слое сухого материала для широкого предела изменения числа Рейнольдса — от 30 до 2200.
3. Проведено сравнение полученных данных с результатами других исследователей по теплообмену в кипящем и неподвижном слоях. Обработка литературных данных по теплообмену в кипящем слое для влажного материала при учете влияния массообмена показала удовлетворительное совпадение результатов других исследователей с результатами настоящей работы. На основании этих данных, а также аналогичных исследований при малых значениях Re_{ϕ} намечена область изменения коэффициентов теплообмена в зависимости от скорости в условиях кипящего слоя.
4. Подтверждено существование переходной области в кипящем слое, где интенсивность теплообмена изменяется обратно пропорционально скорости фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Федоров, Коэффициенты теплоотдачи и испарения при сушке зернистых материалов в полувзвешенном (кипящем) слое. Отчет сушильной лаборатории ВТИ, 1945.
2. Н. А. Шахова, Исследование теплообмена в псевдооживленных системах. Дисс. МИХМ, 1954.
3. K. Kettnering, E. Manderfield, J. Shith, Heat and Mass transfer in fluidized systems. Chemical Engineering Progress, vol. 46, № 3, 1950.
4. J. Walton, K. Olson, W. Levenspiel, Heat transfer coefficient in the fluidized coal bed. Industrial and Engineering Chemistry, vol. 44, № 6, 1952.
5. W. Wamsley, L. Johanson, Fluidized bed heat transfer. Chemical Engineering Progress, vol. 50, № 7, 1954.
6. А. В. Лыков, Теория теплопроводности. ГИТТЛ, 1952.
7. Д. Н. Ляховский, Конвективный теплообмен между газом и взвешенными частицами. ЖТФ, т. 10, вып. 12, 1940.
8. И. Г. Мартюшин, Исследование механизма движения газа во взвешенном слое. Дисс. МИХМ, 1952.
9. З. Ф. Чуханов, Теплообменник системы ЭНИН. Сб. Промышленная энергетика. Изд. АН СССР, 1952.
10. А. В. Лыков, Основные закономерности тепло- и массообмена в процессе сушки. Изв. ВТИ, № 10, 1952.

П. Г. КРОВОТА

ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ
ДВИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ГИРОСКОПА1. Постановка задачи. Формальное образование рядов:
Уравнения для коэффициентов рядов

Пусть имеем тяжелое твердое тело с одной неподвижной точкой, эллипсоид инерции которого относительно неподвижной точки — произвольный.* Центр тяжести тела лежит на главной оси oz эллипсоида инерции. Определим движение такого тела при следующих начальных условиях. Предположим, что в начальный момент $t = 0$, главная ось инерции oz наклонена к вертикали oZ неподвижной системы координат под некоторым углом θ_0 ; ось инерции ox совпадает с oX .

Предположим далее, что телу сообщена большая начальная угловая скорость ω_0 вокруг главной оси инерции oz .

Для решения задачи имеем систему уравнений Эйлера-Пуассона:

$$\begin{aligned} A \frac{dp}{dt} - (B-C)qr &= Mg(z_0\gamma' - y_0\gamma'') & \frac{d\gamma}{dt} &= r\gamma' - q\gamma'' \\ B \frac{dq}{dt} - (C-A)pr &= Mg(x_0\gamma'' - z_0\gamma) & \frac{d\gamma'}{dt} &= p\gamma'' - p\gamma' \\ C \frac{dr}{dt} - (A-B)pq &= Mg(y_0\gamma - x_0\gamma') & \frac{d\gamma''}{dt} &= q\gamma - p\gamma' \end{aligned} \quad (1)$$

Введем вместо переменных p, q, r, t новые переменные P, Q, R, τ , полагая

$$p = \omega_0 P, \quad q = \omega_0 Q, \quad r = \omega_0 R, \quad t = \frac{\tau}{\omega_0} \quad (2)$$

Положим $x_0 = l\xi, y_0 = l\eta, z_0 = l\zeta$,

где l — расстояние центра тяжести от неподвижной точки, ξ, η, ζ — направляющие косинусы прямой, проходящей через центр тяжести и неподвижную точку.

Введем обозначения:

$$\frac{C-B}{A} = a, \quad \frac{C-A}{B} = b, \quad \frac{B-A}{C} = c, \quad \frac{Mgl}{C\omega_0^2} = \lambda^{**} \quad (3)$$

* Вначале мы не налагаем на главные моменты инерции никакого ограничения. Впоследствии выяснится, что главные моменты инерции должны подчиняться определенному условию.

** Отметим, что параметр λ при большой начальной угловой скорости ω_0 будет малой величиной.

Система (1) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} + aQR &= \frac{C}{A} \lambda (\zeta\gamma' - \eta\gamma'') & \frac{d\gamma}{d\tau} &= R\gamma' - Q\gamma'' \\ \frac{dQ}{d\tau} - bPR &= \frac{C}{B} \lambda (\xi\gamma'' - \zeta\gamma') & \frac{d\gamma'}{d\tau} &= P\gamma'' - R\gamma' \\ \frac{dR}{d\tau} + cPQ &= \lambda (\eta\gamma - \xi\gamma') & \frac{d\gamma''}{d\tau} &= Q\gamma - P\gamma' \end{aligned} \quad (4)$$

Интегрируя систему (4), получаем $P, Q, R, \gamma, \gamma', \gamma''$ как функции τ , затем по формулам (2) определяем p, q, r как функции t , далее по формулам $\varphi = \text{arctg} \frac{\gamma'}{\gamma}, \Theta = \text{arccos} \gamma''$ и из уравнения $\frac{d\psi}{dt} = \frac{P\gamma + Q\gamma'}{1-\gamma}$ определяем углы Эйлера, а значит, и движение тела.

В нашем случае будем иметь систему (4) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} + aQR &= \frac{C}{A} \lambda \gamma' & \frac{d\gamma}{d\tau} &= R\gamma' - Q\gamma'' \\ \frac{dQ}{d\tau} - bPR &= \frac{C}{B} \lambda \cdot (-\gamma) & \frac{d\gamma'}{d\tau} &= P\gamma'' - R\gamma' \\ \frac{dR}{d\tau} + cPQ &= 0 & \frac{d\gamma''}{d\tau} &= Q\gamma - P\gamma' \end{aligned} \quad (5)$$

Найдем решение системы (5) при наших начальных условиях: при $\tau = 0$

$$P = 0, Q = 0, R = 1, \gamma = 0, \gamma' = \sin \Theta_0, \gamma'' = \cos \Theta_0. \quad (16)$$

Будем искать решение в виде рядов по степеням малого параметра λ

$$\begin{aligned} P &= p_0 + p_1\lambda + p_2\lambda^2 + \dots & \gamma &= \gamma_0 + \gamma_1\lambda + \gamma_2\lambda^2 + \dots \\ Q &= q_0 + q_1\lambda + q_2\lambda^2 + \dots & \gamma' &= \gamma'_0 + \gamma'_1\lambda + \gamma'_2\lambda^2 + \dots \\ R &= r_0 + r_1\lambda + r_2\lambda^2 + \dots & \gamma'' &= \gamma''_0 + \gamma''_1\lambda + \gamma''_2\lambda^2 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения коэффициентов этих рядов поступим следующим образом. Введем две вспомогательные переменные $u = n\tau, v = m\tau$, где n и m — ряды по степеням параметра λ с пока что неопределенными постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} n &= n_0 + n_1\lambda + n_2\lambda^2 + \dots \\ m &= m_0 + m_1\lambda + m_2\lambda^2 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Будем рассматривать переменные u и v как независимые.

Отметим, что

$$\frac{d}{d\tau} = n \frac{\partial}{\partial u} + m \frac{\partial}{\partial v} \quad (9)$$

Система (5) в переменных u и v согласно (9) запишется так:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial P}{\partial u} + m \frac{\partial P}{\partial v} + aQR &= \frac{C}{A} \lambda \gamma' & n \frac{\partial \gamma}{\partial u} + m \frac{\partial \gamma}{\partial v} &= R\gamma' - Q\gamma'' \\ n \frac{\partial Q}{\partial u} + m \frac{\partial Q}{\partial v} - bPR &= -\frac{C}{B} \lambda \gamma & n \frac{\partial \gamma'}{\partial u} + m \frac{\partial \gamma'}{\partial v} &= P\gamma'' - R\gamma' \\ n \frac{\partial R}{\partial u} + m \frac{\partial R}{\partial v} + cPQ &= 0 & n \frac{\partial \gamma''}{\partial u} + m \frac{\partial \gamma''}{\partial v} &= Q\gamma - P\gamma' \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим ряды (7) вместе с рядами (8) в систему (10), будем иметь

$$\begin{aligned} & (n_0 + n_1\lambda + n_2\lambda^2 + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (p_0 + p_1\lambda + \dots) + \\ & (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (p_0 + p_1\lambda + \dots) + a(q_0 + q_1\lambda + \dots) \times \\ & \times (r_0 + r_1\lambda + \dots) = \frac{C}{A} \lambda (\gamma'_0 + \lambda\gamma'_1 + \dots); \\ & (n_0 + n_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (q_0 + q_1\lambda + \dots) + (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (q_0 + q_1\lambda + \dots) - \\ & - b(p_0 + p_1\lambda + \dots)(r_0 + r_1\lambda + \dots) = -\frac{C}{B} \lambda (\gamma_0 + \gamma_1\lambda + \dots); \\ & (n_0 + n_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (r_0 + r_1\lambda + \dots) + (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (r_0 + r_1\lambda + \dots) + \\ & + c(p_0 + p_1\lambda + \dots)(q_0 + q_1\lambda + \dots) = 0; \quad (11) \\ & (n_0 + n_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (\gamma_0 + \gamma_1\lambda + \dots) + (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (\gamma_0 + \gamma_1\lambda + \dots) = \\ & = (r_0 + r_1\lambda + \dots)(\gamma'_0 + \gamma'_1\lambda + \dots) - (q_0 + q_1\lambda + \dots)(\gamma''_0 + \gamma''_1\lambda + \dots); \\ & (n_0 + n_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (\gamma'_0 + \gamma'_1\lambda + \dots) + (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (\gamma'_0 + \gamma'_1\lambda + \dots) = \\ & = (p_0 + p_1\lambda + \dots)(\gamma''_0 + \gamma''_1\lambda + \dots) - (r_0 + r_1\lambda + \dots)(\gamma_0 + \gamma_1\lambda + \dots); \\ & (n_0 + n_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial u} (\gamma''_0 + \gamma''_1\lambda + \dots) + (m_0 + m_1\lambda + \dots) \frac{\partial}{\partial v} (\gamma''_0 + \gamma''_1\lambda + \dots) = \\ & = (q_0 + q_1\lambda + \dots)(\gamma_0 + \gamma_1\lambda + \dots) - (p_0 + p_1\lambda + \dots)(\gamma'_0 + \gamma'_1\lambda + \dots). \end{aligned}$$

Сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях λ , получим бесконечно много последовательных систем линейных дифференциальных уравнений для определения коэффициентов рядов (7).

Будем искать решения систем периодические по u и v с периодом 2π , удовлетворяющие, согласно (6), начальным условиям: при $u = v = 0$

$$\begin{aligned} p_0, p_1, p_2, \dots; \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \dots; \\ q_0, q_1, q_2, \dots; \gamma'_1, \gamma'_2, \dots; \\ r_1, r_2, \dots; \gamma''_1, \gamma''_2, \dots; \end{aligned} \quad (12)$$

есть нули,

$$r_0 = 1, \gamma'_0 = \sin \Theta_0, \gamma''_0 = \cos \Theta_0.$$

2. Определение коэффициентов

При сравнении свободных членов в системе (11) получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\partial p_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial p_0}{\partial v} + aq_0 r_0 &= 0 & n_0 \frac{\partial \gamma_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma_0}{\partial v} &= r_0 \gamma'_0 - q_0 \gamma''_0 \\ n_0 \frac{\partial q_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial q_0}{\partial v} - b p_0 r_0 &= 0 & n_0 \frac{\partial \gamma'_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma'_0}{\partial v} &= p_0 \gamma''_0 - r_0 \gamma_0 \\ n_0 \frac{\partial r_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial r_0}{\partial v} + c p_0 q_0 &= 0 & n_0 \frac{\partial \gamma''_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma''_0}{\partial v} &= q_0 \gamma_0 - p_0 \gamma'_0 \end{aligned} \quad (13)$$

Имеем начальные условия: при $u = v = 0$

$$p_0 = 0, \quad q_0 = 0, \quad r_0 = 1, \quad \gamma_0 = 0, \quad \gamma'_0 = \sin \theta_0, \quad \gamma''_0 = \cos \theta_0.$$

Можно проверить, что первые три уравнения при любых n_0 и m_0 имеют следующее периодическое по u и v с периодом 2π решение, удовлетворяющее начальным условиям:

$$p_0 = 0, \quad q_0 = 0, \quad r_0 = 1. \quad (14)$$

Тогда три последних уравнения будут таковы:

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\partial \gamma_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma_0}{\partial v} &= \gamma'_0 \\ n_0 \frac{\partial \gamma'_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma'_0}{\partial v} &= -\gamma_0 \\ n_0 \frac{\partial \gamma''_0}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma''_0}{\partial v} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Положим $m_0 = 1$ (16) и будем считать n_0 не равным ни нулю, ни целому числу или обратному целому числу. При этих условиях найдем периодическое по u и v с периодом 2π решение системы (15), удовлетворяющее выбранным начальным условиям.

Получим:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \sin \theta_0 \sin v \\ \gamma'_0 &= \sin \theta_0 \cos v \\ \gamma''_0 &= \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (17)$$

Сравнивая коэффициенты при λ в системе (11) и пользуясь (14), (16), (17), будем иметь следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\partial p_1}{\partial u} + \frac{\partial p_1}{\partial v} + a q_1 &= \frac{C}{A} \sin \theta_0 \cos v \\ n_0 \frac{\partial q_1}{\partial u} + \frac{\partial q_1}{\partial v} - b p_1 &= -\frac{C}{B} \sin \theta_0 \sin v \\ n_0 \frac{\partial r_1}{\partial u} + \frac{\partial r_1}{\partial v} &= 0 \\ n_0 \frac{\partial \gamma_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma_1}{\partial v} - \gamma_1 - r_1 \gamma'_0 &= -q_1 \gamma''_0 - m_1 \sin \theta_0 \cos v \\ n_0 \frac{\partial \gamma'_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma'_1}{\partial v} + \gamma_1 + r_1 \gamma_0 &= p_1 \gamma''_0 + m_1 \sin \theta_0 \sin v \\ n_0 \frac{\partial \gamma''_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma''_1}{\partial v} &= q_1 \gamma_0 - p_1 \gamma'_0. \end{aligned} \quad (18)$$

Найдем периодическое* решение этой системы, удовлетворяющее начальным условиям: при $u = v = 0$ $p_1 = q_1 = r_1 = 0$, $\gamma_1 = \gamma'_1 = \gamma''_1 = 0$

Положим $n_0 = \sqrt{ab}$

Вещественные значения n_0 , согласно равенству (19), будем иметь в случае, если

* В дальнейшем всюду, если не оговорено противное, под периодическим решением будем понимать решение, периодическое по u и v с периодом 2π .

$$ab = \frac{(C-B)(C-A)}{AB}$$

есть величина положительная, то есть при $A > B > C$ или $A < B < C$.

Вследствие этого будем считать в последующем, что тело вращается вокруг большой или малой оси.

При выбранном $n_0 = \sqrt{ab}$, отличном от нуля, целого и обратного целому числа, будем иметь периодическое решение первых трех уравнений системы (18), удовлетворяющее начальным условиям, в виде:

$$\begin{aligned} p_1 &= -\frac{a}{n_0} L_2 \sin u + L_1 \sin v \\ q_1 &= L_2 \cos u - L_2 \cos v \\ r_1 &= 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$L_1 = \frac{2B-C}{A+B-C} \sin \theta_0; \quad L_2 = -\frac{2A-C}{A+B-C} \sin \theta_0.$$

Тогда система уравнений для определения γ_1 , γ'_1 , γ''_1 будет такова:

$$\begin{aligned} n_0 \frac{\partial \gamma_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma_1}{\partial v} - \gamma_1 &= -L_2 \cos \theta_0 \cos u + (L_2 \cos \theta_0 - m_1 \sin \theta_0) \cos v, \\ n_0 \frac{\partial \gamma'_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma'_1}{\partial v} + \gamma_1 &= -\frac{a}{n_0} L_2 \cos \theta_0 \sin u + (L_1 \cos \theta_0 + m_1 \sin \theta_0) \sin v, \\ n_0 \frac{\partial \gamma''_1}{\partial u} + \frac{\partial \gamma''_1}{\partial v} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{n_0}\right) L_2 \sin \theta_0 \sin(u+v) + \\ &+ \frac{1}{2} \left(-1 + \frac{a}{n_0}\right) L_2 \sin \theta_0 \sin(u-v) - \frac{1}{2} (L_1 + L_2) \sin \theta_0 \sin 2v. \end{aligned} \quad (21)$$

Положим

$$m_1 = -\frac{1}{2} (L_1 - L_2) \operatorname{ctg} \theta_0. \quad (22)$$

При рассматриваемом $n_0 = \sqrt{ab}$ и выбранном m_1 получим периодическое решение системы (21), удовлетворяющее начальным условиям,

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= -(L_3 + L_5) \sin v + L_4 \sin u \\ \gamma'_1 &= -L_6 \cos v + L_5 \cos u, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\gamma''_1 = L_6 \cos(u+v) + L_7 \cos(u-v) + L_8 \cos 2v + L_9,$$

где

$$\begin{aligned} L_3 &= -\frac{1}{2} (L_1 + L_2) \cos \theta_0, \quad L_4 = \frac{n_0^2 - a}{(1 - n_0^2)n_0} L_2 \cos \theta_0, \\ L_5 &= \frac{1-a}{1-n_0^2} L_2 \cos \theta_0, \quad L_6 = \frac{-1}{2(1+n_0)} \left(1 + \frac{a}{n_0}\right) L_2 \sin \theta_0, \\ L_7 &= \frac{1}{2(1-n_0)} \left(-1 + \frac{a}{n_0}\right) L_2 \sin \theta_0, \quad L_8 = \frac{1}{4} (L_1 + L_2) \sin \theta_0, \\ L_9 &= -(L_6 + L_7 + L_8). \end{aligned}$$

Таким образом, сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях в

уравнениях (11), мы будем получать системы уравнений, отличающиеся от уравнений (18) только правыми частями. Эти уравнения могут быть решены так же, как уравнение (18). Процесс последовательных приближений может продолжаться неограниченно долго, и в результате получаются выражения искомых функций $p, q, r, \gamma, \gamma', \gamma''$ в виде рядов по степеням малого параметра λ .

3. Возможность определения коэффициентов рядов в виде тригонометрических многочленов

Методом индукции можно доказать, что коэффициенты рядов (7) $p_k, q_k, r_k, \gamma_k, \gamma'_k, \gamma''_k$ для любого k могут быть найдены в виде тригонометрических многочленов по u и v при условиях: 1) $n_0 = \sqrt{\frac{(C-B)(C-A)}{AB}}$

есть действительное иррациональное число и 2) $L_2 = \frac{2A-C}{A+B-C} \sin \theta_0$ равно нулю.

Причем среди коэффициентов этих тригонометрических многочленов, начиная с некоторого тригонометрического многочлена (вполне определенного для каждого ряда по λ), будут наверняка встречаться достаточно большие коэффициенты.

4. О сходимости рядов

Получены ряды:

$$P = \lambda \left[-\frac{a}{n_0} L_2 \sin u + L_1 \sin v \right] + \dots$$

$$Q = \lambda [L_2 \cos u + L_2 \cos v] + \dots$$

$$R = 1 + \dots$$

$$\gamma = \sin \theta_0 \sin v + \lambda [- (L_3 + L_5) \sin v + L_4 \sin u] + \dots$$

$$\gamma' = \sin \theta_0 \cos v + \lambda [- (L_5 \cos v + L_5 \cos u) + \dots$$

$$\gamma'' = \cos \theta_0 + \lambda [L_6 \cos (u+v) + L_7 \cos (u-v) + L_8 \cos 2v + L_9] + \dots \quad (24)$$

где постоянные имеют ранее указанные значения. Эти ряды формально удовлетворяют системе (5).

Согласно сказанному в предыдущем разделе относительно коэффициентов этих рядов, для каждого из рядов (24) имеется член, начиная с которого коэффициенты ряда будут принимать достаточно большие значения. Поэтому полученные ряды являются расходящимися. Докажем, что они асимптотически изображают искомое частное решение системы (5). А. Пуанкаре доказал следующую теорему*:

«Пусть имеем систему дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = X_i \quad (25)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n),$$

где X_i однозначные функции t, x_1, x_2, \dots, x_n и параметра μ , разложимые в ряды по возрастающим степеням $x_1, x_2, \dots, x_n, \mu$, и имеем n расходящихся рядов

$$\begin{aligned} S_1 &= f_{01} + \mu f_{11} + \mu^2 f_{21} + \dots \\ S_2 &= f_{02} + \mu f_{12} + \mu^2 f_{22} + \dots \end{aligned} \quad (26)$$

$$S_n = f_{0n} + \mu f_{1n} + \mu^2 f_{2n} + \dots$$

Предполагаем, что f_{lk} будут известные функции t и μ и что эти функции разложимы в сходящиеся ряды по возрастающим степеням μ . Предполагаем далее, что ряды формально удовлетворяют дифференциальным уравнениям, т. е. если φ_{pk} сумма $p+1$ членов ряда S_k , то при подстановке $\varphi_{p1}, \varphi_{p2}, \dots, \varphi_{pn}$ на место x_1, x_2, \dots, x_n разность $\frac{dx_i}{dt} - X_i$ станет делимой на μ^{p+1}

Рассмотрим частное решение уравнений, зная, что

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0 \text{ для } t = 0 \quad (27)$$

Пусть

$$x_1 = \Theta_1(t, \mu), \quad x_2 = \Theta_2(t, \mu), \dots, x_n = \Theta_n(t, \mu)$$

это частное решение. Предполагаем, что все функции f_{lk} уничтожаются при $t = 0$.

Будем иметь следующие асимптотические равенства:

$$\Theta_1(t, \mu) \equiv S_1, \quad \Theta_2(t, \mu) \equiv S_2, \dots, \Theta_n(t, \mu) \equiv S_n^*$$

Положим*

$$x_1 = P \quad x_4 = \gamma - \gamma_0$$

$$x_2 = Q \quad x_5 = \gamma' - \gamma'_0$$

$$x_3 = R - 1 \quad x_6 = \gamma'' - \gamma''_0$$

Система (5) в переменных $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ запишется

$$\frac{dx_1}{d\tau} + ax_2(x_3+1) = \frac{C}{A} \lambda (x_5 + \gamma'_0) \quad \frac{dx_4}{d\tau} = (x_5+1)(x_5+\gamma'_0) - x_2(x_6+\gamma''_0)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} - bx_1(x_3+1) = -\frac{C}{B} \lambda (x_4 + \gamma_0) \quad \frac{dx_5}{d\tau} = x_1(x_6+\gamma''_0) - (x_3+1)x_4$$

$$\frac{dx_3}{d\tau} + cx_1x_2 = 0 \quad \frac{dx_6}{d\tau} = x_2(x_4 + \gamma_0) - (x_5 + \gamma'_0)x_1 \quad (28)$$

Начальные условия (6) примут вид:

$$\text{при } \tau = 0 \quad x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = 0 \quad (29)$$

Мы нашли ряды:

$$\begin{aligned} x_1 &= p_1\lambda + p_2\lambda^2 + \dots & x_4 &= \gamma_1\lambda + \gamma_2\lambda^2 + \dots \\ x_2 &= q_1\lambda + q_2\lambda^2 + \dots & x_5 &= \gamma'_1\lambda + \gamma'_2\lambda^2 + \dots \\ x_3 &= r_1\lambda + r_2\lambda^2 + \dots & x_6 &= \gamma''_1\lambda + \gamma''_2\lambda^2 + \dots \end{aligned} \quad (30)$$

которые формально удовлетворяют системе, причем все функции

$$p_1, p_2, \dots; q_1, q_2, \dots; r_1, r_2, \dots; \gamma_1, \gamma_2, \dots;$$

$$\gamma'_1, \gamma'_2, \dots; \gamma''_1, \gamma''_2, \dots$$

суть нули при $\tau = 0$.

Система (28) есть частный случай системы (25), ряды (30) являются частным случаем рядов (26), начальные условия (29) совпадают с начальными условиями (27).

* Величины $\gamma_0, \gamma'_0, \gamma''_0$ определены формулами (17).

Следовательно, по теореме Пуанкаре ряды (30) являются асимптотическими для искомого частного решения системы (28).

Значит, и ряды (24) асимптотически представляют искомое частное решение системы (5).

5. Геометрическая картина движения в первом приближении

Ограничиваясь первыми членами в рядах для P, Q, R, γ, γ' и двумя членами в ряду для γ'' , будем иметь

$$P = \lambda \left(-\frac{a}{n_0} L_2 \sin u + L_1 \sin v \right)$$

$$Q = \lambda (L_2 \cos u + L_2 \cos v)$$

$$R = 1$$

$$\gamma = \sin \Theta_0 \sin v$$

$$\gamma' = \sin \Theta_0 \cos v$$

$$\gamma'' = \cos \Theta_0 + \lambda [L_0 \cos (u + v) + L_7 \cos (u - v) + L_8 \cos 2v + L_9],$$

где L_k определены в конце раздела 2, n_0 дано формулой (19),

$$u = n_0 \omega_0 t, \quad v = \omega_0 t.$$

Проведем на основании формул (31) анализ движения тяжелого твердого тела.

Для этого найдем перемещение в пространстве оси вращения oz подвижной системы координат. Введем в рассмотрение углы Эйлера, определяя их обычным способом. Для нахождения этих углов имеем формулы:

$$\frac{1}{\omega_0} (\psi - \psi_0) = \int_{t_0}^t \frac{P\gamma + Q\gamma'}{1 - \gamma'^2} dt$$

$$\cos \Theta = \gamma''$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\gamma}{\gamma'}$$

Подставляя в формулы (32) величины (31) и ограничиваясь учетом первых степеней λ , получаем

$$\frac{1}{\omega_0} (\psi - \psi_0) = \lambda \left\{ \frac{L_1 - L_2}{2 \sin \Theta_0} \cdot t + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{n_0} \right) \frac{L_2}{\sin \Theta_0} \cdot \frac{\sin (n_0 - 1) \omega_0 t}{(n_0 - 1) \omega_0} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{n_0} \right) \frac{L_2}{\sin \Theta_0} \cdot \frac{\sin (n_0 + 1) \omega_0 t}{(n_0 + 1) \omega_0} - \frac{1}{2} (L_1 + L_2) \frac{\sin 2 \omega_0 t}{2 \omega_0} \right\};$$

$$\cos \Theta = \cos \Theta_0 + \lambda (L_6 \cos (n_0 + 1) \omega_0 t + L_7 \cos (n_0 - 1) \omega_0 t + L_8 \cos 2 \omega_0 t + L_9),$$

$$\varphi = \omega_0 t,$$

(33) и начальные условия (6): при $\tau = 0$

Из полученных формул (33) видим, что гироскоп совершает псевдо-регулярную прецессию. Ось гироскопа совершает в среднем прецессию вокруг вертикальной оси с угловой скоростью

$$\left[\frac{d\psi}{dt} \right] = \lambda \omega_0 \frac{L_1 - L_2}{2 \sin \Theta_0} = \frac{Mgt}{C \omega_0}$$

Эта прецессия сопровождается нутацией, определяемой второй из формул (33).

В качестве примера рассмотрим гироскоп Лагранжа. В этом случае формулы (33) будут иметь вид

$$\frac{1}{\omega_0} (\psi - \psi_0) = \lambda \left[t - \frac{\sin \frac{C}{A} \omega_0 t}{\frac{C}{A} \omega_0} \right]$$

$$\cos \Theta = \cos \Theta_0 + \lambda \left[\frac{C}{A} \sin^2 \Theta \left(\cos \frac{C}{A} \omega_0 t - 1 \right) \right]$$

$$\varphi = \omega_0 t,$$

где $a = \left(\frac{C}{A} - 1 \right)$ — иррациональное число.

Получили хорошо известный результат, но с ограничением на моменты инерции, что обусловлено методом.

6. Исследование случая, когда центр тяжести гироскопа лежит на оси ou эллипсоида инерции

Рассмотрим движение тяжелого твердого тела с одной неподвижной точкой, эллипсоид инерции которого, построенный для неподвижной точки, по-прежнему произвольный, а центр тяжести расположен на главной оси ou эллипсоида инерции. Будем считать, что в начальный момент $t = 0$ оси подвижного трехгранника $oxyz$ расположены по отношению к осям неподвижного $oXYZ$ так, как сказано в разделе 1.

Предположим, что телу сообщена начальная очень большая угловая скорость ω_0 вокруг главной оси инерции oz .

В данном случае имеем систему (4) в виде:

$$\frac{dP}{d\tau} + aQR = \frac{C}{A} \lambda \cdot (-\gamma'')$$

$$\frac{dQ}{d\tau} - bPR = 0$$

$$\frac{dR}{d\tau} + cPQ = \lambda \gamma$$

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = R\gamma' - Q\gamma''$$

$$\frac{d\gamma'}{d\tau} = P\gamma'' - P\gamma$$

$$\frac{d\gamma''}{d\tau} = Q\gamma - P\gamma'$$

(34)

$$P = 0, \quad Q = 0, \quad R = 1, \quad \gamma = 0, \quad \gamma' = \sin \Theta_0, \quad \gamma'' = \cos \Theta_0. \quad (35)$$

Решение системы (34) ищем, как и раньше, в виде рядов (7) по степеням малого параметра λ .

Для определения коэффициентов этих рядов вводим опять вместо τ две переменные $u = (n_0 + n_1 \lambda + \dots) \tau$ и $v = (m_0 + m_1 \lambda + \dots) \tau$, которые рассматриваем как независимые и получаем последовательные системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
n_0 \frac{\partial p_k}{\partial u} + m_0 \frac{\partial p_k}{\partial v} + a(q_0 r_k + q_k r_0) &= -n_k \frac{\partial p_0}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial p_{k-1}}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial p_0}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial p_{k-1}}{\partial v} - a(q_1 r_{k-1} + \dots + q_{k-1} r_1) - \frac{C}{A} \gamma_{k-1}^* & \\
n_0 \frac{\partial q_k}{\partial u} + m_0 \frac{\partial q_k}{\partial v} - b(p_0 r_k + p_k r_0) &= -n_k \frac{\partial q_0}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial q_{k-1}}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial q_0}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial q_{k-1}}{\partial v} + b(p_1 r_{k-1} + \dots + p_{k-1} r_1) & \\
n_0 \frac{\partial r_k}{\partial u} + m_0 \frac{\partial r_k}{\partial v} + c(p_0 q_k + p_k q_0) &= -n_k \frac{\partial r_0}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial r_{k-1}}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial r_0}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial r_{k-1}}{\partial v} - c(p_1 q_{k-1} + \dots + p_{k-1} q_1) + \gamma_{k-1} & \\
n_0 \frac{\partial \gamma_k}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma_k}{\partial v} - (r_0 \gamma_k' + r_k \gamma_0') + q_0 \gamma_k'' + q_k \gamma_0'' &= -n_k \frac{\partial \gamma_0}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial \gamma_0}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}}{\partial v} + r_1 \gamma_{k-1}' + \dots + r_{k-1} \gamma_1' - & \\
- (q_1 \gamma_{k-1}'' + \dots + q_{k-1} \gamma_1'') & \\
n_0 \frac{\partial \gamma_k'}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma_k'}{\partial v} - (p_0 \gamma_k' + p_k \gamma_0') + (r_0 \gamma_k + r_k \gamma_0) &= -n_k \frac{\partial \gamma_0'}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}'}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial \gamma_0'}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}'}{\partial v} + p_1 \gamma_{k-1}' + \dots + p_{k-1} \gamma_1' - & \\
- r_1 \gamma_{k-1} - \dots - r_{k-1} \gamma_1 & \\
n_0 \frac{\partial \gamma_k''}{\partial u} + m_0 \frac{\partial \gamma_k''}{\partial v} - (q_0 \gamma_k'' + q_k \gamma_0'') + (p_k \gamma_0' + p_0 \gamma_k') &= -n_k \frac{\partial \gamma_0''}{\partial u} - \dots - n_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}''}{\partial u} - \\
- m_k \frac{\partial \gamma_0''}{\partial v} - \dots - m_1 \frac{\partial \gamma_{k-1}''}{\partial v} + q_1 \gamma_{k-1}'' + \dots + q_{k-1} \gamma_1'' - & \\
- (p_1 \gamma_{k-1}' + \dots + p_{k-1} \gamma_1') & \\
(\kappa = 0, 1, 2, \dots) & \quad (3)
\end{aligned}$$

Будем искать решения систем периодические по u и v с периодом 2π , удовлетворяющие начальным условиям (35).

Коэффициенты рядов по степеням λ могут быть найдены совершенно так же, как в разделе 2. Согласно теореме Пуанкаре, это опять будут асимптотические ряды, дающие решение системы (34).

Ограничиваясь членами, содержащими λ в первой степени, можно получить следующие формулы:

$$P = \lambda \frac{a}{n_0} L_1 \sin u$$

$$Q = \lambda (-L_1 \cos u + L_1)$$

$$R = 1 + \lambda (-L_2 + L_2 \cos v)$$

$$\gamma = \sin \Theta_0 \sin v$$

$$\gamma' = \sin \Theta_0 \cos v$$

$$\gamma'' = \cos \Theta_0 + \lambda (L_{11} + L_8 \cos v + L_9 \cos (u + v) + L_{10} \cos (u - v)),$$

где

$$L_1 = \frac{C}{B-C} \cos \Theta_0 \quad L_2 = -\sin \Theta_0$$

$$L_8 = -L_1 \sin \Theta_0 \quad L_9 = \frac{a+n_0}{2n_0(1+n_0)} L_1 \sin \Theta_0$$

$$L_{10} = \frac{a-n_0}{(n_0-1)n_0} L_1 \sin \Theta_0 \quad L_{11} = -(L_8 + L_9 + L_{10})$$

$$u = n_0 \omega_0 t \quad v = \omega_0 t$$

Основываясь на этих формулах, определим перемещение в пространстве оси вращения oz . Углы Эйлера в данном случае выразятся следующими формулами (с учетом лишь первых степеней λ):

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\omega_0} (\psi - \psi_0) &= \int_0^t \frac{\lambda}{2} \frac{L_1}{\sin \Theta_0} \left\{ \frac{a-n_0}{n_0} \cos (n_0-1) \omega_0 t - \frac{a+n_0}{n_0} \cos (n_0+1) \omega_0 t + \right. \\
&\quad \left. + 2 \cos \omega_0 t \right\} dt = \\
&= \frac{\lambda L_1}{2 \sin \Theta_0} \left\{ \frac{a-n_0}{n_0} \frac{\sin (n_0-1) \omega_0 t}{(n_0-1) \omega_0} - \frac{a+n_0}{n_0} \frac{\sin (n_0+1) \omega_0 t}{(n_0+1) \omega_0} + \frac{2 \sin \omega_0 t}{\omega_0} \right\}, \\
\cos \Theta &= \cos \Theta_0 + \lambda \{ L_{11} + L_8 \cos \omega_0 t + L_9 \cos (n_0+1) \omega_0 t + \\
&\quad + L_{10} \cos (n_0-1) \omega_0 t \} \\
\operatorname{tg} \varphi &= \operatorname{tg} \omega_0 t.
\end{aligned}$$

Из полученных формул видим, что ось гироскопа oz дрожит вокруг положения $\psi = \psi_0$, $\Theta = \Theta_0$.

7. Движение гироскопа с центром тяжести в главной плоскости

В заключение приведем результаты о движении несимметричного гироскопа, центр тяжести которого расположен в главной плоскости, причем в начальный момент гироскопу сообщается большая угловая скорость вокруг главной оси.

Задача решается методом, изложенным в разделе 1.

Пусть центр тяжести расположен в главной плоскости hoz . Допустим далее, что в начальный момент $t=0$ трехгранник главных осей $охуз$ эллипсоида инерции совпадает с неподвижным трехгранником $охуз$. Предположим, что гироскопу сообщена большая угловая скорость ω_0 вокруг главной оси инерции $ох$.

В рассматриваемом случае интеграл системы (4), удовлетворяющий начальным условиям, будет представлять собой расходящиеся асимптотические ряды при условиях:

$$1) \text{ выражение } n_0 = \sqrt{\frac{(C-A)(B-A)}{BC}} \text{ есть иррациональное число,}$$

$$2) L_2 = \frac{A-2B}{B(n_0^2-1)} \neq 0.$$

Для проведения анализа движения оси $ох$ введем в рассмотрение углы Эйлера ϵ , ζ , φ , определяя их следующим образом*.

* Л. Н. Сре́тенский, Движение гироскопа Горячева — Чаплыгина. Изв. АН СССР, № 1, 1953.

Обозначим через ε угол между неподвижной осью oZ и подвижной осью oX ; обозначим через χ угол между неподвижной осью oX и линией пересечения oY плоскостей XoY и yoZ ; обозначим через φ угол между линией oY и подвижной осью oy .

Для определения углов Эйлера будем иметь формулы:

$$\begin{aligned}\cos \varepsilon &= \gamma \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{q\gamma' + r\gamma''}{1 - \gamma^2} \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{\gamma'}{\gamma''}\end{aligned}$$

Углы Эйлера, вычисленные по этим формулам согласно решению для данного случая системы (4), будут следующими (в первом приближении):

$$\begin{aligned}\frac{1}{\omega_0} (z - z_0) &= \int_0^t \lambda \left\{ \frac{L_1 + L_2}{2} - \frac{1}{2} \frac{(n_0 + b)}{n_0} L_2 \cos(n_0 + 1) \omega_0 t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \frac{(n_0 + b)}{n_0} L_2 \cos(n_0 - 1) \omega_0 t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} (L_1 - L_2) \cos 2 \omega_0 t \right\} dt = \\ &= \lambda \left\{ \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot t - \frac{1}{2} \frac{n_0 - b}{n_0} L_2 \frac{\sin(n_0 + 1) \omega_0 t}{(n_0 + 1) \omega_0} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \frac{n_0 + b}{n_0} L_2 \frac{\sin(n_0 - 1) \omega_0 t}{(n_0 - 1) \omega_0} - \frac{1}{2} (L_1 - L_2) \frac{\sin 2 \omega_0 t}{2 \omega_0} \right\} \\ \cos \varepsilon &= \lambda \{ L_8 \cos(n_0 + 1) \omega_0 t + L_9 \cos(n_0 - 1) \omega_0 t + L_{10} \cos 2 \omega_0 t + L_{11} \} \\ \varphi &= \omega_0 t,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}L_1 &= \frac{(A - 2C)}{B(n_0^2 - 1)} \xi & L_2 &= \frac{(A - 2B)}{B(n_0^2 - 1)} \xi \\ L_8 &= \frac{(n_0 - b)}{2n_0(1 + n_0)} \cdot L_2 & L_9 &= \frac{(b + n_0)}{2n_0(1 - n_0)} \cdot L_2 \\ L_{10} &= \frac{1}{4} (L_1 - L_2) & L_{11} &= -(L_8 + L_9 + L_{10}).\end{aligned}$$

Отсюда находим, что скорость изменения угла χ в среднем будет определяться формулой

$$\left[\frac{dz}{dt} \right] = \frac{MgI\xi}{A\omega^0}$$

Ось гироскопа oX будет совершать прецессию. Прецессия будет сопровождаться очень малой нутацией.

Поступила в редакцию
31/1 1958

Г. С. ЗОЛОТАРЕНКО

О РАСПРОСТРАНЕНИИ И ЭКОЛОГИИ ПУШИСТОГО ШЕЛКОПРЯДА

В лесознтомологической литературе вспышки массового размножения пушистого шелкопряда в СССР не отмечались. По А. И. Ильинскому [1], этот вид значительных повреждений лесным насаждениям не наносит. Однако, по данным Е. Ф. Мартыновой [2], в Южном Предуралье пушистый шелкопряд встречается в массе и заметно вредит лесам. О появлении большого количества гусениц в насаждениях Новосибирской области и Алтайского края упоминает А. И. Черепанов [3]. По нашим наблюдениям, в Ключевском районе Алтайского края в 1952—1953 гг. пушистый шелкопряд серьезно вредил иве. На участке ивовых плантаций площадью 25 м² насчитывалось примерно 5000 гусениц, они объедали все листья на кустах. В посадках яблони сибирской на площади около 2 га к 15 июня 1953 г. гусеницы объели 50—70 % листьев. Такое же объедание гусеницами листьев березы, яблони и вяза было нами зарегистрировано в насаждениях Карасукского и Купинского районов Новосибирской области. В 1953—1954 гг. пушистый шелкопряд серьезно повреждал насаждения лиственных пород в Чановском, Татарском, Усть-Таркском, Венгеровском, Куйбышевском, Барабинском районах Новосибирской области [4].

Литературные сведения о пушистом шелкопряде неполны и разрозненны. В атласах А. Зейца [5], К. Ламперта [6] вместе с морфологическим описанием этого вида приводятся краткие данные о его географическом распространении и о растениях, которые пушистый шелкопряд поедает. В каталоге О. Штаудингера и Х. Ребеля [7], справочнике «Вредители леса» [8] также в общих чертах описывается ареал этого вида. В работах ряда авторов [2, 4, 9—13] рассматриваются отдельные вопросы экологии пушистого шелкопряда. Более полные, но не исчерпывающие сведения о его образе жизни приведены лишь А. И. Черепановым [3].

Пушистый шелкопряд — *Eriogaster lanestris* L. (*Lepidoptera, Lasio-campidae*) — впервые описан Карлом Линнеем в 1758 г. [14]. В дальнейшем морфологическое описание различных фаз развития этого вида приводилось в ряде работ иностранных и русских авторов. Поэтому мы не рассматриваем здесь вопросов морфологии пушистого шелкопряда и останавливаемся на его географическом распространении и экологии. Кроме материалов и наблюдений, собранных нами, были использованы коллекции Зоологического института АН СССР, Томского университета и литературные данные. Экология пушистого шелкопряда нами изучалась в лесостепных и степных районах Новосибирской области, Алтайского и Красноярского краев в 1952—1953, 1955 гг. и в южных районах Томской области (Кожевниково) в 1957 г.

Ареал пушистого шелкопряда довольно обширен и занимает в основном бореавразийскую подобласть Палеарктики. Только самыми южными точками он заходит в северную часть средиземноморской подобласти. В СССР он известен в Ленинграде, Прибалтике (Вильнюс, Псков), Мо-

гилеве, Москве, Калуге, Туле, Орле, Тамбове, Горьком, Ульяновске, Поволжье (Саратов, Губорля, Астрахань), в Казани, Уфе, Оренбурге, Уральске, по всей Западной Сибири (Томск, Асино, Кожевниково, Новосибирск, Омск, Курган, Карасук, Славгород, Ключи, Змеиногорск, Спасск, Ачинск), в Казахстане (Тургай, Павлодар), Туве, Восточной Сибири (Хабаровск), Уссурийском крае и Приморье (Владивосток). В пределах своего ареала пушистый шелкопряд в основном заселяет изреженные, хорошо освещенные насаждения.

Бабочки пушистого шелкопряда летают рано весной. В Западной Сибири они появляются в конце второй — начале третьей декады апреля. В насаждениях Ключевского района (Алтайский край) в 1953 г. бабочки начали летать с 20 апреля и встречались до 4 мая (лет продолжался 14—15 дней). В окрестностях Новосибирска в 1954 г. их лет наблюдался с 23 апреля до конца первой декады мая.

Бабочки ведут сумеречный образ жизни: летают только после захода солнца до наступления темноты. Их лет обычно начинается около 20 часов и продолжается не более часа. Летают больше самцы. Они почти все время держатся в воздухе, на высоте 1—1,5 м над растениями. Самки, выйдя из коконов и обсохнув, взлетают над кустами. К ним в этот момент подлетают самцы, и тогда бабочки опускаются на верхние ветки деревьев или кустов. Здесь происходит спаривание их, продолжающееся не более 3—5 минут. Затем самец улетает, а самка начинает откладывать яйца.

Бабочки пушистого шелкопряда, как имаго большинства видов семейства *Lasiocampidae*, выходят из коконов с вполне созревшими половыми продуктами. В питании бабочки не нуждаются. Продолжительность их жизни невелика. Самки живут всего несколько часов. В наших опытах в садках они вскоре после выхода из куколок спаривались, откладывали яйца и погибали через 2—3 часа после этого.

На плантации ивы близ с. Ключи (Алтайский край) каждое утро можно было найти мертвых самок. С 22 апреля по 4 мая на участке площадью 100 м² было собрано 29 погибших самок бабочек. Они лежали на земле около кустов, на которых были свежееотложенные яйца. Самцы живут по нескольку дней. В садках продолжительность их жизни доходила до пяти дней. Утром, днем и ночью (после окончания лета) самцов обычно можно найти сидящими на стволах, ветках и листьях в насаждениях (рис. 1). Например, 23 апреля с 7 до 10 часов на молодых соснах, которые росли близ ивовой плантации, было собрано 32 живых самца. При осмотре этих же деревьев в 21 час на них опять были обнаружены самцы, которые оставались здесь до вечера следующего дня. Бабочки пушистого шелкопряда (как самцы, так и самки) не летят на свет и не реагируют на поднесенный к ним зажженный фонарь.

Выше уже отмечалось, что бабочки пушистого шелкопряда выходят из коконов вполне готовыми к спариванию, после которого самки сразу приступают к кладке яиц. Однако имеется утверждение [4], что бабоч-

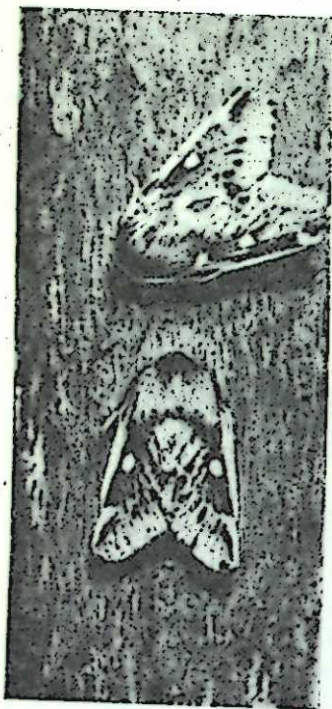


Рис. 1. Бабочки — самцы пушистого шелкопряда на дневке.

ки начинают откладывать яйца лишь через несколько дней после выхода из куколок. Наши наблюдения этого не подтверждают. Это не так уже потому, что продолжительность жизни самки исчисляется не днями, а часами. Кроме того, появление в природе бабочек и свежееотложенных яиц нами было зарегистрировано в один и тот же день.

Наблюдения за кладкой яиц пушистого шелкопряда проводились нами на ивовой плантации. Здесь был выбран участок, занимающий 270 м². На нем росло 2736 кустов ивы, которые были посажены в 36 рядов. С 20 апреля по 4 мая на этом участке ежедневно проводился подсчет свежих яйцекладок. В течение 15-дневной бабочки отложили здесь 138 яйцекладок в следующие сроки: 20 апреля — 1,6% яйцекладок, 21—25 апреля — 55%, 26—30 апреля — 39,8%, 1—4 мая — 3,6%. Следовательно, массовая кладка яиц у пушистого шелкопряда в степных районах Западной Сибири происходит в третьей декаде апреля.

Бабочки откладывают яйца на тонкие ветки, преимущественно на верхние побеги различных деревьев и кустарников. Кладка яиц происходит следующим образом. Самка садится на побег (головой вверх) и начинает медленно передвигаться вдоль него по спирали вверх. В это время яйца выходят из яйцеклада и откладываются на ветке спиральной лентой, прикрытой сверху серым пушком. Весь процесс откладки яиц продолжается около 1 часа, иногда немного дольше. При этом все яйца, которые способна отложить одна самка, кладутся ею в одно место. Последнее подтверждают наблюдения за бабочками, выведенными в садках. Бабочки откладывали по одной яйцекладке и после этого погибали. При вскрытии самок (всего вскрыто 10 бабочек-самок), не начинавших откладывать яйца, у каждой из них в яйцевых трубках насчитывалось от 212 до 393 (в среднем 286) яиц. Примерно такое же количество яиц (от 215 до 350) находилось в каждой из кладок, собранных в насаждениях.

По данным Н. П. Малыхина [4], наблюдавшего пушистого шелкопряда в Чановском районе Новосибирской области в 1954 г., выход гусениц из яиц происходил на 30—33-и сутки. По нашим наблюдениям в окрестностях с. Ключи в 1953 г., развитие яиц продолжалось в течение 16—23 дней (табл. 1). Такое различие в сроках эмбрионального развития, по-видимому, объясняется разницей погодных условий в 1953 и 1954 гг. В 1953 г. весна в лесостепных и степных районах Западной Сибири была жаркой и засушливой, а в 1954 г. изобилвала осадками, которые привели к некоторому похолоданию, задержавшему развитие яиц.

Таблица 1

Продолжительность развития яиц пушистого шелкопряда (по наблюдениям 1953 г.)

Дата	Отложено яйцо-кладок	Сроки начала выхода гусениц															
		8/V		10/V		11/V		12/V		13/V		14/V		15/V		16/V	
		к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях	к-во кладок	развитие в днях
2/IV	10	—	—	4	19	3	20	2	21	1	22	—	—	—	—	—	—
23/IV	26	1	16	4	18	5	19	12	20	—	21	—	—	—	1	23	—
24/IV	16	—	—	2	17	4	18	6	19	—	—	3	21	—	—	1	23
25/IV	13	—	—	1	16	5	17	5	18	2	19	—	—	—	—	—	—
26/IV	12	—	—	—	—	6	16	3	17	1	18	1	19	1	20	—	—
Всего	77	1	—	11	—	23	—	28	—	7	—	4	—	2	—	1	—

Молодые гусеницы появляются в насаждениях в первой половине мая. В 1953 г. в лесополосах Ключевского района гусеницы отрождались в следующие сроки: к 10 мая из каждых 100 яйцекладок гусеницы вышли в 13 кладках, 11—15 мая — в 61, 16—20 — в 64. Массовый выход гусениц наблюдался в середине мая; к концу этого месяца отрождение их закончилось.

Вышедшие из яиц гусеницы некоторое время сидят на яйцекладке, а затем на ветках и листьях строят из паутины «гнезда» (рис. 2). В каж-

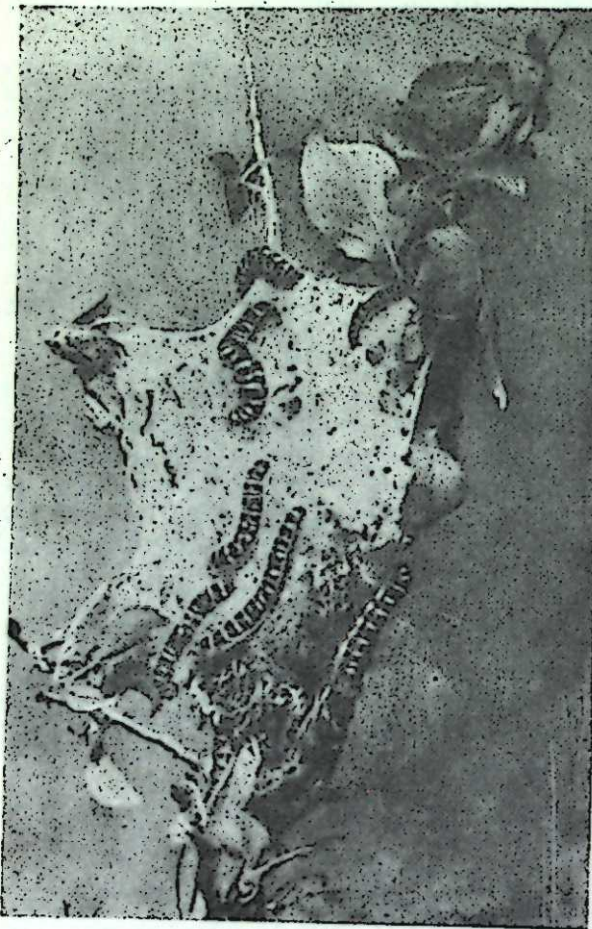


Рис. 2. «Гнездо» с гусеницами пушистого шелкопряда.

дом таком «гнезде» живут гусеницы, вышедшие из одной яйцекладки, составляя как бы одну семью.

После постройки «гнезда» гусеницы начинают питаться. В первые дни жизни они соскабливают мягкие части листьев, оставляя жилки и верхний эпидермис. Позже съедают весь лист, кроме черешка. Питаются гусеницы обычно утром и вечером. Днем, во время жары, ночью и в непогоду они прячутся в «гнезда».

Систематические наблюдения за гусеницами, жившими в 15 «гнездах» на плантации ивы, позволили установить следующую закономерность в их поведении. Утром, при температуре 18—22°, они обычно ползают по веткам, грызут листья. Позже, примерно к 10 часам, когда температура воздуха повышается до 25—27°, начинают собираться в «гнезда». В это время продолжают питаться только

те гусеницы, «гнезда» которых находятся на теневой стороне кустов. В полдень, когда температура воздуха достигает 29—31°, гусеницы во всех «гнездах» собираются на теневую сторону. Если «гнездо» этой стороной повернуть к солнцу, то гусеницы немедленно переползают на другую, затененную, или прячутся внутри «гнезда». К вечеру, когда температура падает до 18—20°, гусеницы покидают «гнезда», расползаются по веткам и грызут листья. С наступлением темноты они снова собираются в «гнезда», где проводят ночь. Следовательно, суточная активность гусениц пушистого шелкопряда определяется температурными условиями: они активны при 18—20°, а с повышением температуры до 29—31° или с понижением до 14—15° перестают питаться и прячутся в «гнезда».

Гусеницы пушистого шелкопряда довольно многоядны. Они питаются в основном листьями ивы и тополя различных видов, осины, березы, дуба, вяза перистоветвистого, терновника, шиповника, боярышника, бобовника, вишни степной, яблонь, слив, абрикоса. В Западной Сибири основными кормовыми породами для гусениц являются в естественных насаждениях — ивы, береза, осина, в поймах — тополь черный, в искусственных посадках — ива ломкая, тополь бальзамический, вяз перистоветвистый, береза, яблоня сибирская. Кроме того, гусеницы последнего возраста нередко питаются травянистой растительностью. Наши наблюдения показывают, что они охотно поедают кровохлебку. На питание гусениц травянистыми растениями указывает также Н. П. Малыгин [4].

Гусеницы пушистого шелкопряда в течение жизни линяют четыре раза. При наблюдении за ростом их в лаборатории* установлено, что они имеют 5 возрастов, которые различаются между собой размерами головных капсул гусениц (табл. 2). Гусеницам I возраста соответствовала ширина головы 0,2—0,3 мм, II — 0,7—0,8 мм, III — 1—1,5 мм, IV — 2—2,3 мм, V — 3—3,3 мм.

Таблица 2

Сроки линек, количество возрастов и ширина головной капсулы гусениц пушистого шелкопряда

Гусеница	I возраст		II возраст (после первой линьки)		III возраст (после второй линьки)		IV возраст (после третьей линьки)		V возраст (после четвертой линьки)		Дата коконирования
	дата выхода гусеницы из яйца	ширина головы, мм	дата линьки	ширина головы, мм	дата линьки	ширина головы, мм	дата линьки	ширина головы, мм	дата линьки	ширина головы, мм	
1	11/V	0,2	19/V	0,7	25/V	1,1	31/V	2,0	12/VI	3,1	25/VI
2	11/V	0,2	18/V	0,7	27/V	1,0	1/VI	2,0	13/VI	3,1	26/VI
3	11/V	0,3	22/V	0,7	27/V	1,1	1/VI	2,1	13/VI	3,2	29/VI
4	11/V	0,2	22/V	0,8	27/V	1,3	1/VI	2,1	13/VI	3,2	26/VI
5	11/V	0,3	17/V	0,8	24/V	1,4	31/V	2,0	14/VI	3,1	25/VI
6	11/V	0,3	19/V	0,8	26/V	1,3	1/VI	2,2	14/VI	3,1	26/VI
7	11/V	0,3	17/V	0,7	25/V	1,1	2/VI	2,1	15/VI	3,1	2/VII
8	9/V	0,2	15/V	0,7	24/V	1,5	1/VI	2,3	13/VI	3,3	3/VII
9	9/V	0,3	15/V	0,8	25/V	1,4	1/VI	2,2	13/VI	3,1	3/VII
10	9/V	0,3	16/V	0,7	25/V	1,3	2/VI	2,1	15/VI	3,1	4/VII
11	9/V	0,3	15/V	0,7	31/V	1,2	8/VI	2,0	16/VI	3,0	5/VII
12	9/V	0,2	15/V	0,8	24/V	1,3	1/VI	2,2	17/VI	3,1	5/VII
13	9/V	0,2	16/V	0,8	29/V	1,5	1/VI	2,4	22/VI	3,3	5/VII
14	9/V	0,2	15/V	0,7	25/V	1,4	1/VI	2,1	22/VI	3,2	5/VII
15	9/V	0,3	15/V	0,8	26/V	1,1	3/VI	2,0	22/VI	3,0	8/VII

В 1953 г. в течение 46 дней (с 10/V по 25/VI) нами было также собрано в насаждениях 400 гусениц. В результате их измерений установлено, что до 15 мая в насаждениях встречались гусеницы I возраста, с 15 по 31 мая — II и III, с 1 по 14 июня — III, IV и V, с 15 по 25 июня — V.

Линька гусениц происходит в «гнездах»; здесь же скапливаются их экзувии и экскременты. «Гнездо» загрязняется. Поэтому перелинявшие гусеницы покидают свое «гнездо», переползают на другую ветку или дерево и здесь строят новое. Для этого они обычно ползут вниз по ветке, на которой расположено старое «гнездо», а затем поднимаются на со-

* Наблюдения проводились над 15 гусеницами, которые находились в отдельном садке с момента выхода из яйца до окукливания.

седний побег куста или дерева и здесь строят новое. Если на кусте, где было первоначальное «гнездо», все листья оказывались объединенными, то гусеницы переселялись на соседние кусты или деревья. При этом они спускались на землю, ползли до другого куста, поднимались на одну из его веток и строили «гнездо». В одном случае гусеницы с одного куста ивы переселились на другой, находившийся в 2 м от первого. Другая «семья» гусениц с ивы перекочевала на молодой тополь, который рос на открытом месте в 10 м от ивы. Такие перекочевки на новые места (на одном и том же дереве или с одних деревьев на другие) с устройством новых «гнезд» гусеницы совершают три раза, т. е. после первой, второй и третьей линьки. В V возрасте (после четвертой линьки) они покидают «гнезда», расползаются в разные стороны и живут поодиночке.

В степных и лесостепных районах Западной Сибири гусеницы начинают покидать «гнезда» во второй половине июня. В конце этого месяца или в начале июля гусеницы последнего возраста заканчивают питание, зарываются в подстилку, делают там плотные пергаментовидные овальные коконы и в них окукливаются. В лесных полосах Ключевского района коконы пушистого шелкопряда в 1952 г. впервые появились 2 июля, в 1953 г. — 27 июня. В насаждениях Карасукского района (Новосибирская область) в 1953 г. коконирование гусениц началось 25 июня, а близ Ачинска (Красноярский край) в 1955 г. коконы пушистого шелкопряда впервые стали попадаться с 24 июня. В Кожевниковском районе (Томская область) в 1957 г. коконирование гусениц происходило во второй декаде июля. По данным А. И. Черепанова [3], в Ключевском районе в 1951 г. к 20 июня из каждых 100 гусениц закончилось 15.

Фаза проницания у гусениц пушистого шелкопряда продолжается около 13—18 дней, затем они превращаются в куколок. Куколки зимуют. Однако весной следующего года не из всех перезимовавших куколок вылетают бабочки. Известно, что около 70% куколок пушистого шелкопряда зимует несколько раз, зимовка может повторяться до 9 раз [5, 10, 12]. В наших опытах куколки зимовали до четырех раз. Так, осенью 1953 г. на зимовку было оставлено 85 куколок, из них в период с 1953 по 1957 гг. погибло 47. Остальные 38 дали бабочек, причем весной 1954 г. отродилось 28 бабочек, в 1955 г. — 4, в 1956 г. — 2 и в 1957 г. — 4. Полный цикл развития пушистого шелкопряда из яиц, отложенных в 1953 г., показан в табл. 3.

Таблица 3

Цикл развития пушистого шелкопряда из яиц, отложенных в 1953 г.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Год												
1953	—	—	—	б я	б я	г	г	к	к	к	к	к
1954	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
1955	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
1956	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
1957	к	к	к	б	б	—	—	—	—	—	—	—

Условные обозначения: б — бабочки, я — яйца, г — гусеницы, к — куколки.

Врагов у пушистого шелкопряда сравнительно немного. Известно, что на гусеницах паразитирует 9 видов наездников семейства *Ichneumonidae* и тахина *Baumbaueria gonioformis* Meig. [3, 15, 16].

В процессе наблюдений над пушистым шелкопрядом нами обнаружено, что в гусеницах и куколках этого вида паразитируют следующие насекомые: *Dibrachys cavus* Wlk. (*Chalcidoidea*)*, *Allocamptus undulatus* Grav. (*Ichneumonidae*)**, тахины (*Larvivoridae*) и бракониды (*Braconidae*)***. Из перепончатокрылых насекомых основным паразитом пушистого шелкопряда в степной полосе Западной Сибири (Кулунда) является *Allocamptus undulatus* Grav. В насаждениях Ключевского района, по данным А. И. Черепанова [3], в 1951 г. от этого наездника погибло более 26% гусениц пушистого шелкопряда. По нашим наблюдениям, в этих же насаждениях в 1952 и 1953 гг. от наездника погибло соответственно 51,2% и 44% гусениц.

Кроме насекомых-паразитов, пушистого шелкопряда уничтожают птицы и некоторые млекопитающие. В частности, в лесных полосах Кулунды можно наблюдать, как ушастые ежи (*Erinaceus auritus* Gmel.), роясь в подстилке, разыскивают и поедают гусениц и куколок пушистого шелкопряда. По устному сообщению Б. С. Юдина, гусениц и куколок охотно едят землеройки (*Sorex* L.).

Для борьбы с пушистым шелкопрядом рекомендуется собирать и уничтожать яйцекладки, «гнезда» с гусеницами, обрабатывать насаждения препаратами ДДТ и гексахлорана [3, 4]. Нами в 1953 г. против гусениц III—IV возрастов испытаны 5-процентный ДДТ, 12-процентный гексахлоран и 1-процентный раствор минерально-масляной эмульсии ДДТ. Опыты проводились в насаждениях Ключевского и Карасукского районов. Обработка опытных участков производилась с помощью опрыскивателя ОРМ и опрыскивателя ОРП-1. Результаты опытов показали, что 5-процентный дуст и 1-процентная эмульсия ДДТ для гусениц более токсичны, чем 12-процентный гексахлоран. Количественный учет гусениц****; проведенный через сутки после обработки опытных участков, показал, что от препаратов ДДТ погибает от 92 до 100% гусениц, тогда как от гексахлорана гибнет всего 70%.

Основываясь на результатах проведенных опытов, считаем возможным применять препараты ДДТ в борьбе с гусеницами пушистого шелкопряда в следующих дозировках: 5-процентный дуст — 20 кг/га, 1-процентный водный раствор минерально-масляной эмульсии — 400 л/га. Насаждения следует обрабатывать в первой половине июня, т. е. в период пребывания гусениц в «гнездах».

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
13/XI 1957

ЛИТЕРАТУРА

- А. И. Ильинский, Определитель яйцекладок, личинок и куколок насекомых, вредных в лесном хозяйстве. М.—Л., 1948.
- Е. Ф. Мартынова, Особенности фауны чешуекрылых Южного Предуралья и ее

* Определен М. Н. Никольской.

** Определен А. Н. Желоховцевым.

*** Тахины и бракониды точнее не определены.

**** Учет погибших гусениц велся на учетных площадках под модельными деревьями: живые гусеницы учитывались методом спускания кроны на этих же деревьях.

- значение для степного лесоразведения. Тр. Зоолог. ин-та АН СССР, т. XI, М.—Л., 1952.
3. А. И. Черепанов, Вредные насекомые полезных лесных полос. Новосибирск, 1952.
 4. Н. П. Малыгин, Пушистый шелкопряд в Новосибирской области. Лесн. хоз., № 10, 1955.
 5. A. Seitz, Die Gross. Schmetterlinge des Erde, B. I, T. 2, Stuttgart, 1913.
 6. К. Ламперт, Атлас бабочек и гусениц. СПб, 1913.
 7. O. Staudinger, H. Rebel, Catalog der Lepidopteren des Palaearctischen Faunengebietes, T. I—II, Berlin, 1901.
 8. Вредители леса, справочник, т. I, М.—Л., 1955.
 9. Ф. Кенпен, Вредные насекомые, т. III., СПб, 1883.
 10. Н. Кузнецов, К фауне Псковской губернии. Тр. Русск. энтомолог. об-ва, XXXIII, № 1—2, СПб, 1900.
 11. Н. Л. Сахаров, Вредные насекомые Нижнего Поволжья. Саратов, 1947.
 12. Лесная энтомология под ред. М. Н. Римского-Корсакова и В. И. Гусева, изд. 3-е, М.—Л., 1949.
 13. J. Komárek, J. Tučák, Atlas motýlu. Praha, 1952.
 14. K. Linne, Sistema Naturae. ed. X. 1758.
 15. Н. Ф. Мейер, Паразитические перепончатокрылые сем. *Ichneumonidae* СССР и сопредельных стран. Вып. VI, М.—Л., 1936.
 16. И. Д. Белановский, Тахины Украинской ССР, ч. II, Киев, 1953.

А. Б. ГУКАСЯН

**БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКОЕ И БАКТЕРИЦИДНОЕ ДЕЙСТВИЕ
ХВОИ И ЕЕ ХИМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ
НА ВОЗБУДИТЕЛЯ БОЛЕЗНИ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА**

За последнее десятилетие в биологии накоплен большой фактический материал об антибиотических веществах бактерий, актиномицетов и грибов. В 1928 г., т. е. на год раньше первых исследований А. Ф. Флеминга, положивших начало получению препаратов пенициллина, Б. П. Токиным были обнаружены антибактериальные вещества высших растений — фитонциды.

Большой практический интерес представляет изучение антибактериального действия фитонцидов на патогенные и сапрофитные микроорганизмы.

Б. П. Токин [1] доказал, что летучие вещества, выделяющиеся из хвои сосны, убивают протозою в течение 10—15 мин., летучие вещества из хвои пихты — за 5 мин., ели — за 10—15 мин., кедра — за 15 мин., а водный настой хвои этих растений убивает протозою моментально.

Б. П. Токин, А. В. Коваленок и Т. Д. Янович (см. [1]) установили, что микрофлора воздуха в лесах различных типов различна и одним из многочисленных факторов «регуировки» ее состава являются фитонциды.

М. А. Комарова (см. [2]) в 1954 г. пыталась использовать летучие фитонциды при оздоровлении воздуха помещений детских яслей. Когда в помещение вносили свежую ветку пихты, в воздухе уменьшалось количество микробов, гибли патогенные формы (золотистый стафилококк, коклюшная палочка и др.).

Литературные данные по антибактериальному действию фитонцидов, а также наши исследования привели к мысли о необходимости выяснить влияние хвои на возбудителя болезни сибирского шелкопряда (*Bac. dendrolimus* Tal.).

Результаты наблюдений показали, что применение возбудителя болезни сибирского шелкопряда вызывает в большинстве случаев до 97 из 100 гибель гусениц. Однако как в наших опытах [3], так и в опытах Е. В. Талалаева [4] массовой эпизоотии среди насекомых от внесенной инфекции не было. Для успешного применения бактериальных препаратов необходимо было выявить факторы, препятствующие самостоятельному распространению внесенной инфекции среди гусениц сибирского шелкопряда. Во всех предшествующих опытах не учитывалось влияние окружающей среды на испытываемую культуру, т. е. бактерицидность хвои.

В настоящей работе обобщаются результаты двухгодичных (1956—1957 гг.) полевых и лабораторных исследований бактериостатического и бактерицидного действия хвои и ее химических компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда. До нас этим вопросом никто не занимался.

Первый опыт был поставлен в лабораторных условиях в Магалинском лесничестве (д. Тазырбак Пышкино-Троицкого района Томской области) в 1956 г. Для опыта брали свежую хвою пихты, кедра, лиственницы, сосны и ели. Проводили его в четырех повторностях.

Чтобы определить антибактериальные свойства различной хвои, применяли «метод отпечаток». Взвесь суточной культуры, содержащая 2 млрд. бактерий в 1 мл, равномерно разбрызгивалась пульверизатором на хвою, через 1, 10, 20, 30, 48, 64, 96 и 194 часа хвоя срывалась стерильным пинцетом, и тут же производился посев путем отпечатка обенх строн хвои на МПА (мясо-пептонный агар).

На отпечатках, сделанных через 1, 10, 20 и 30 часов после заражения хвои, получили на МПА рост колонии испытываемой культуры, на отпечатках в последующие часы рост ее стал слабее, а после 194 часов почти отсутствовал.

Антибактериальную активность хвои проверяли также, раскладывая ее на поверхности МПА, засеянного испытываемой культурой.

Результаты опыта приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Бактериостатическое действие хвои на возбудителя болезни сибирского шелкопряда (опыт в четырех повторностях)

Объект исследований	Радиус стерильной зоны, мм			
	1	2	3	4
Хвоя пихты	16	17	18	16
Кора пихты	8	10	7	8
Хвоя кедра	13	12	10	12
Кора кедра	8	6	6	7
Хвоя сосны	8	10	9	10
Кора сосны	2	3	3	3

Как видно из табл. 1, наиболее бактериостатичными свойствами обладала хвоя пихты. Зона задержки роста испытываемой культуры вокруг хвои достигла 18 мм, вокруг кедра — 13 мм, вокруг сосны — 8 мм. Хвоя лиственницы и ели оказалась (в условиях наших опытов) совершенно небактериостатичной по отношению к возбудителю болезни сибирского шелкопряда.

На основании проведенных опытов мы пришли к выводу о бактериостатическом действии хвои кедра, пихты и сосны на возбудителя болезни сибирского шелкопряда. Стала ясна и причина различного процента гибели гусениц сибирского шелкопряда на хвое разных пород спустя 3, 5, 10, 15, 20, 30 дней после опрыскивания культурой.

Опыты, проведенные в условиях тайги, были продолжены в стационарной лаборатории.

Были испытаны пихтовое масло и его компоненты: борнилацетат — $\text{CH}_3\text{CO}-\text{O}-\text{C}_{10}\text{H}_{17}$; изоборнилацетат — $\text{CH}_3\text{CO}-\text{O}-\text{C}_{10}\text{H}_{17}$; дипентен (*dl*-лимонен) — $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ (моноклический терпен); *L*- α -пинен — $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ (бициклический терпен); β -пинен — $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ (бициклический терпен); *l*-камфен — $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ (бициклический терпен); борнеол — $\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$ (бициклический терпеновый спирт); изоборнеол — $\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$ (бициклический терпеновый спирт, стероизомер борнеола); скипидар (сесквитерпен).

Борнеол и изоборнеол хорошо растворяются в слабом спиртовом

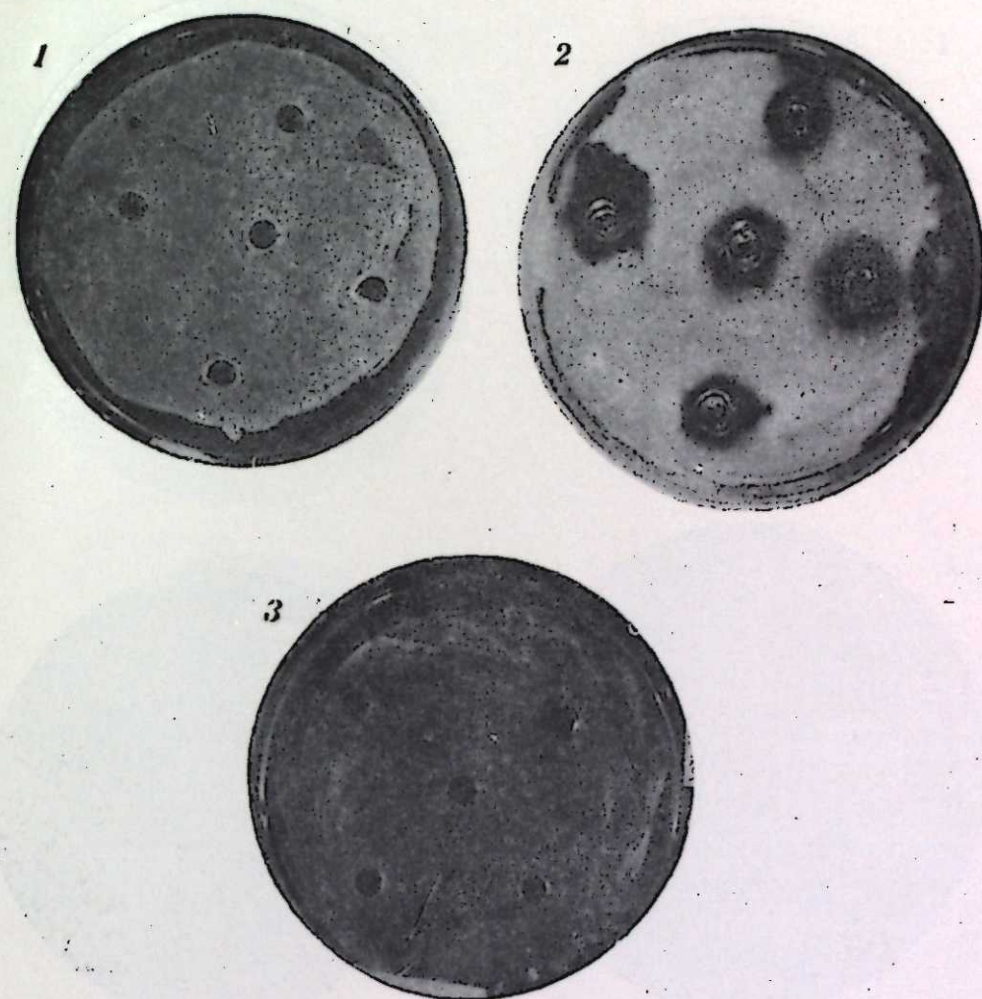


Рис. 1. Бактериостатическое действие борнилацетата на рост возбудителя болезни сибирского шелкопряда

1 — контрольная чашка (сплошной рост бактерий), 2 и 3 — подавление роста бактерий при возрастании концентрации борнилацетата.

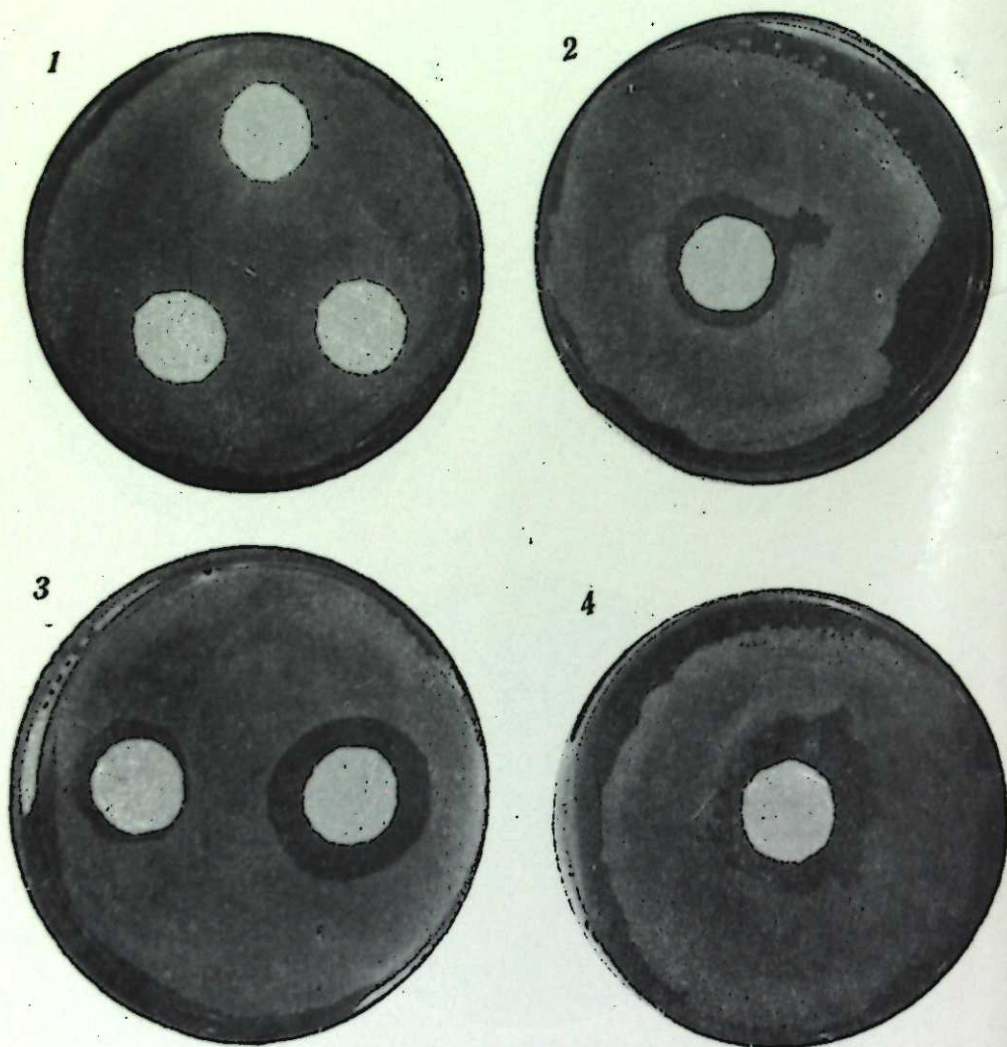


Рис. 2. Бактериостатическое действие пихтового масла на рост возбудителя болезни сибирского шелкопряда.

1 — контрольная чашка (сплошной рост бактерий), 2, 3, 4 — подавление роста бактерий при возрастании концентрации пихтового масла (3 — состояние бактерий при слабой и сильной концентрации пихтового масла).

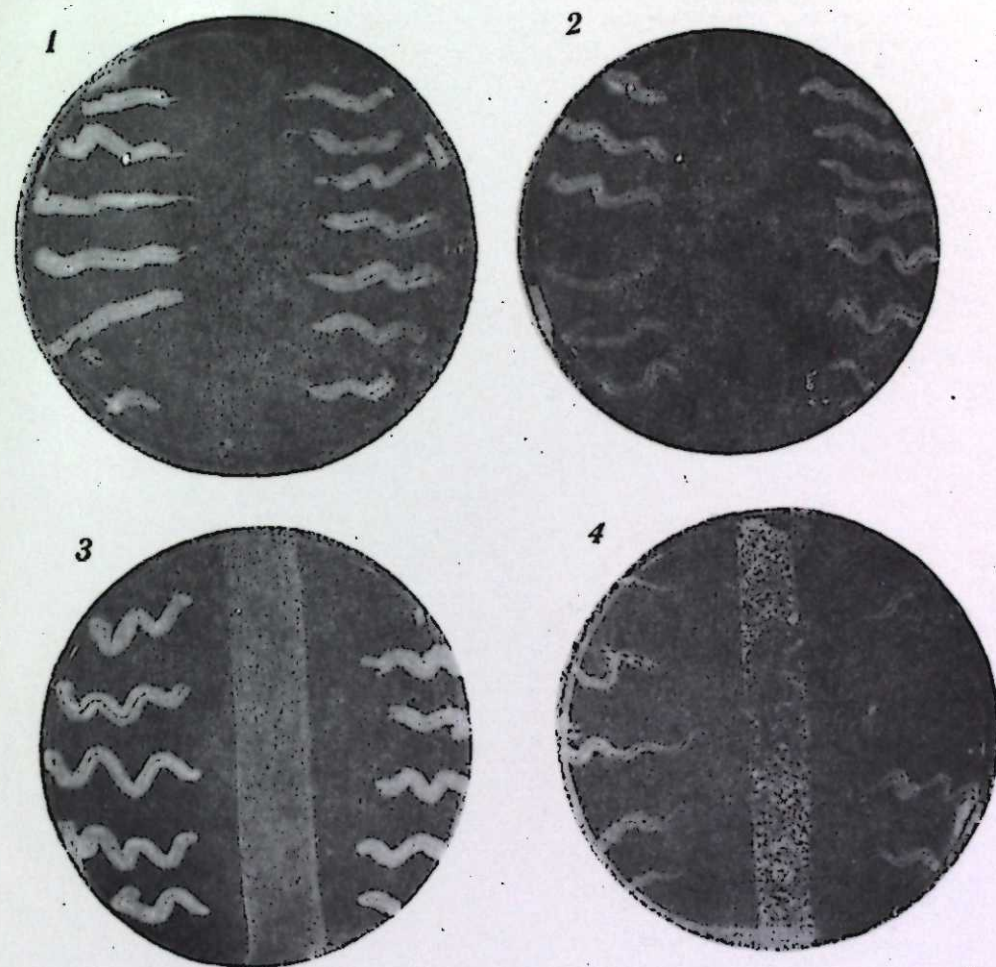


Рис. 3. Бактериостатическое действие компонентов пихтового масла на рост возбудителя болезни сибирского шелкопряда.

Задержка роста бактерий прямо пропорциональна концентрации пихтового масла.

растворе, поэтому были поставлены аналогичные опыты с этиловым спиртом.

Исследовались также эфирные масла пихты, кедра, сосны, полученные нами летом 1957 г. в условиях тайги.

Остановимся лишь на действии пихтового масла и его компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда, так как действие эфирных масел сосны и кедра оказалось таким же, как и пихтового масла.

Антибактериальную активность компонентов хвой для получения сравнительных данных испытывали на *Bac. mycoides*, *Bact. prodigiosum* и *Bact. coli*.

Для выявления антибактериальных свойств химических компонентов хвой пихты были использованы различные методы.

Опыт проводился в трех повторностях на твердой (агаризованной) и жидкой среде (МПБ). Во всех случаях применялась суточная культура. Необходимо отметить, что все методы определения чувствительности испытываемой культуры к пихтовому маслу и его компонентам дали одинаковые результаты.

Нам удалось установить, что компоненты пихтового масла обладают высокой бактериостатичностью по отношению к возбудителю болезни сибирского шелкопряда.

При постановке опытов применялись метод разведения агаровых пластинок (см. [5]), а также метод А. Флеминга [6] (серийное разведение на МПБ).

Титром пихтового масла и его компонентов мы считали наибольшее разведение, при котором наблюдается полная задержка роста испытываемой культуры. Интенсивность роста отмечали знаками + (интенсивный), ± (слабый), — (отсутствие роста); контроль обозначен знаком +.

Результаты опытов приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Бактериостатичность пихтового масла и его компонентов на МПА (разведение агаровых пластинок) и на МПБ (серийное разведение)

Химические компоненты хвой пихты	<i>Bac. dendrolimus</i> Tal.						<i>Bac. mycoides</i>					
	Концентрация (разведение) компонентов											
	1:1000	1:500	1:200	1:100	1:50	1:10	1:1000	1:500	1:200	1:100	1:50	1:10
Пихтовое масло (в целом)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Борнилацетат	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Изоборнилацетат	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Борнеол	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Изоборнеол	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
L-пинен	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β-пинен	+	+	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Дипентен	+	+	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Скипидар	+	+	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
l-камфен	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Контроль без компонентов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Данные табл. 2 показывают, что бактериостатичностью по отношению к возбудителю болезни сибирского шелкопряда обладают пихтовое масло, борнилацетат, изоборнилацетат и скипидар в разведениях 1 : 500, а динентен — 1 : 200. Наименее бактериостатичными оказались бициклические терпены (*L-a*-пинен, β -пинен и *l*-камфен), проявившие свое действие лишь в концентрациях 1 : 10.

Химические компоненты хвои пихты и пихтового масла оказались небактериостатичными по отношению к неспороносным формам микробов — *Bact. prodigiosum* и *Bact. coli*.

Антибактериальную активность пихтового масла и его компонентов мы проверяли методом блоков, предложенным Н. А. Красильниковым [7], и кольцевым методом Хитли [8]. Диаметр зоны угнетения роста микробов вокруг ямочек и блоков измеряли с точностью до 0,05 мм.

Соотношение между концентрацией борнилацетата и зоной угнетения испытываемой культуры приводится на рис. 1. На рис. 1 видно, что величина зоны стерильности прямо пропорциональна концентрации компонента хвои.

Высокую бактериостатичность по отношению к возбудителю болезни сибирского шелкопряда показали пихтовое масло, борнилацетат, изоборнилацетат и скипидар.

Антибактериальное действие компонентов хвои проверялось также методом индикаторных дисков [9], который благодаря простоте доступен каждой лаборатории.

Результаты опытов, проводившихся этим методом, приводятся на рис. 2, где показаны диаметры зон стерильности испытываемой культуры *Bac. dendrolimus* Tal. при использовании обычного мясо-пептонного агара (рН = 7,2—7,3), разлитого в чашки Петри слоем в 0,5—0,6 см. Диски диаметром 0,9 см из обычной фильтровальной бумаги смачивали в растворе различной концентрации пихтового масла и его компонентов перед нанесением их на чашку Петри, после чего чашки переносили в термостат.

Опыты показали, что возбудитель болезни сибирского шелкопряда высоко чувствителен к компонентам пихтового масла. Методом индикаторных дисков установлено, что чувствительность *Bac. dendrolimus* и *Bac. mycolides* к пихтовому маслу, скипидару, борнилацетату и изоборнилацетату проявляется при концентрациях последних 1 : 500, к динентену при концентрациях его 1 : 200, *l*-камфену — 1 : 100, а к *L-a*-пинену, β -пинену — 1 : 50 (табл. 3). На неспороносы (*Bact. prodigiosum*, *Bact. coli*) фитонциды пихтового масла не влияют.

Бактериостатическое действие пихтового масла и его компонентов проверяли кольцевым методом Хитли и Флори (см. [10]), несколько видоизмененным нами. В середину стерильной чашки Петри ставили стерильные маленькие фарфоровые тигли, затем разливали МПА в чашки до $\frac{3}{4}$ высоты тигля. После охлаждения агара его засеивали суточной испытываемой культурой. В тигель вводили испытываемую жидкость хвои в различных разведениях и инкубировали, не поворачивая тигель вверх дном. Во избежание быстрого нагрева и конденсации водяных паров на крышке, чашки ставили на толстую деревянную подставку. Результаты измерения циркулем зоны торможения, образовавшейся вокруг тигля, были аналогичны полученным по методу индикаторных дисков.

Конечная цель опыта, поставленного по видоизмененному нами кольцевому методу, выяснить, не уменьшается ли количество атмосферного кислорода в чашках за счет улетучивания эфирного масла и его компонентов из тигля. Если уменьшение кислорода происходит, то это вызы-

Таблица 3
Бактериостатичность пихтового масла и его компонентов, определенная методом индикаторных дисков
(радиус стерильной зоны в мм)

Химические компоненты хвои пихты	<i>Bac. dendrolimus</i> Tal.						<i>Bac. mycolides</i>					
	Концентрация (разведение) компонентов											
	1:1000	1:500	1:200	1:100	1:50	1:10	1:1000	1:500	1:200	1:100	1:50	1:10
Пихтовое масло (в целом)	—	5	10	15	30	60	—	3	6	20	25	55
Борнилацетат	—	2	7	10	15	20	—	2	4	8	12	18
Изоборнилацетат	—	5	8	13	18	25	—	2	6	4	16	17
Борнеол	—	2	7	10	15	30	—	1	7	10	17	22
Изоборнеол	—	—	5	10	14	25	—	—	4	8	12	20
<i>L-a</i> -пинен	—	—	—	—	2	6	—	—	—	—	—	3
β -пинен	—	—	—	—	1	2	—	—	—	—	—	—
Динентен	—	—	2	5	7	15	—	—	0,5	5	8	20
<i>l</i> -камфен	—	—	—	8	10	15	—	—	—	6	11	18
Скипидар	—	6	8	10	15	35	—	3	5	7	17	30
Контроль (без компонентов)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

вает кислородное голодание возбудителя болезни сибирского шелкопряда, в результате чего отсутствует рост на МПА. Выяснилось, что химические компоненты пихтового масла не создают кислородного голодания (как мы предполагали), показатель этого — бурный рост представителя факультативного аэроба *Bact. prodigiosum*.

Чтобы еще раз убедиться, что у испытываемых культур, находящихся под влиянием улетучивающихся компонентов пихтового масла, нет кислородного голодания, мы провели следующие опыты: чашки Петри, засеянные культурой, переворачивали дном вверх, после чего на крышку вносили 0,5 мл компонентов пихтового масла указанной выше концентрации и в таком виде культивировали. Результаты опытов также показали отсутствие кислородного голодания в опытных чашках Петри.

Антибактериальное действие пихтового масла и его химических компонентов было выявлено и по методу Флеминга [6] (метод желобочка). Результаты опытов показаны на рис. 3.

Бактериостатическое действие хвойных компонентов было проверено методом столбикового агара; результаты аналогичны полученным по методу Флеминга.

Для выявления продолжительности действия пихтового масла и его химических компонентов на некоторые физиологические функции возбудителя болезни сибирского шелкопряда опыт ставился в различных вариантах.

1. Метод экспозиции: к суточной культуре на косом МПА подливали различного разведения компоненты хвои, а через определенный промежуток времени делали посев на косой МПА без компонентов.

2. Метод «предметных стекол», видоизмененный «метод петелек»: приготовленный на предметном стекле тонкий мазочек испытываемой культуры высушивали на воздухе, затем погружали в стеклянные бюк-

сы с заранее приготовленным раствором компонентов хвои и плотно закрывали крышку бюкса, чтобы не улетучивались фитонциды; после определенного срока экспозиции из этого мазочка делали посев на МПА.

Опыты, проведенные этими методами, показали, что с увеличением времени экспозиции прекращается рост испытываемой культуры на МПА.

Для выяснения бактерицидного действия пихтового масла и его компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда делали высевы из чашек Петри с МПА, в которых отсутствовал видимый невооруженным глазом рост испытываемой культуры, на жидкие и твердые питательные среды.

Проведенными опытами определено, что пихтовое масло и его компоненты в низких концентрациях бактериостатичны, а в высоких — бактерицидны к возбудителю болезни сибирского шелкопряда.

Важно было также выяснить влияние химических компонентов пихтового масла на окрашиваемость клеток возбудителя и на его морфологические изменения. Особенный интерес представляла возможность восстановления нарушенных физиологических функций при создании нормальных условий для возбудителя болезни сибирского шелкопряда.

Опыт проводился в камерах, приготовленных из парафина (подобно кольцам Ван-Тигема). Первая и третья камеры были наполнены мясопептонным бульоном ($pH = 7,0$), а вторая — компонентами пихтового масла при различных концентрациях. Над второй камерой помещали висячую каплю испытываемой культуры. Края покровного стекла были герметично прикрыты. В таком положении под микроскопом следили за подвижностью микробов и морфологическим изменением их. После того как микробы теряли подвижность, покровное стекло с висячей каплей осторожно переносили из второй камеры в первую или в третью и определяли, через какое время восстанавливается утерянная подвижность.

Результаты такого исследования показали, что прекращение и восстановление подвижности микроба зависит от действия компонентов хвои: от концентрации вещества, сроков экспозиции, а также температуры помещений.

Микроскопическое наблюдение над культурой в висячей капле показало, что компоненты хвои вначале усиливают движение микробов, а затем тормозят и прекращают его. Появляются гигантские формы микробов, клетки набухают, образуют веретенообразные, кластридиальные и нитеобразные формы. По мере воздействия компонентов хвои клетки утолщаются, часто в поле зрения попадают различные их формы, появляется зернистость, клетка просвечивается в 3—4 местах. Клетки плохо воспринимают анилиновые краски.

Наличие разнообразной морфологии испытываемых культур объясняется влиянием различных компонентов хвои.

Таким образом, полевые и лабораторные исследования показали высокое бактериостатическое и бактерицидное действие пихтового масла и его химических компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда.

Работами А. П. Пентегова и его сотрудников [11] констатируется высокое содержание бактерицидных и бактериостатических веществ в пихтовом масле: борнилацетата — до 41,5%, 1-борнеола — 3,6%, L-α-пинена — 29,7%, 1-камфена — 15,8% и β-пинена — 8,1%.

Необходимо отметить, что в естественных условиях часто происходит ранение хвойных растений, обусловленное, казалось бы, незначительными причинами: деятельностью ветра, дождя, насекомых, птиц,

человека и т. п. Несомненно, что при повреждении хвои повышается выделение в атмосферу летучих фитонцидов.

Высокое содержание бактерицидных и бактериостатических компонентов в хвое дает нам право сделать определенные выводы:

1. Одним из основных факторов, препятствующих самостоятельному распространению эпизоотии при однократном внесении инфекции среды сибирского шелкопряда является бактериостатическое и бактерицидное действие хвои и ее компонентов.

2. Бактериостатическое и бактерицидное действие хвои и ее компонентов на возбудителя болезни сибирского шелкопряда зависит от концентрации и продолжительности воздействия.

3. Хвоя пихты и ее компоненты оказались не бактериостатичными и не бактерицидными по отношению к *Bact. prodigiosum* и *Bact. coli*.

4. При поисках других возбудителей болезни сибирского шелкопряда необходимо выбирать такие формы микробов, которые бы обладали высокой энтомопатогенностью, быстро самостоятельно распространялись при однократном внесении и не теряли активности от бактериостатического и бактерицидного воздействия хвои.

5. Рациональный выбор возбудителей было бы целесообразно вести путем селекции (направленной изменчивости), т. е. приучая энтомопатогенную культуру к хвойным компонентам при сохранении и у нее энтомопатогенности и устойчивости к действию хвои.

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
23/XI 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. П. Токин, Фитонциды. Изд. АН СССР, М., 1948.
2. Б. П. Токин, Фитонциды и медицина. Антибиотики, Медгиз, 1956.
3. А. Б. Гукасян, Н. Г. Коломнец, Опыт использования шелкопрядной бациллы в борьбе с сибирским шелкопрядом. Лесное хозяйство, № 1, 1957.
4. Е. В. Талалаев, Септицемия гусениц сибирского шелкопряда. Микробиология, № 1, 1956.
5. З. А. Ваксман, Антагонизм микробов и антибиотические вещества. М., 1947.
6. A. Fleming, Penicillin its practical application under the General editorship of proff. London, Butterworth Co., 1946.
7. Н. А. Красильников, Антибиотики-антагонисты и антибиотические вещества. Изд. АН СССР, 1950.
8. N. G. Heatley, A. Method for the Assay of Penicillin. The Biochemical J., vol. 38, 1944.
9. Н. С. Егоров, Влияние микробов-антагонистов и биологические методы учета их антибактериальной активности. Изд. МГУ, 1957.
10. З. В. Ермолова, Пенициллин. Медгиз, 1946.
11. А. П. Пентегов, М. А. Чиркова, Л. И. Сухорукова, О. П. Кузнецова, Изучение состава пихтового масла, полученного из веток (лапок) сибирской пихты. Тр. Хим.-металлург. ин-та ЗСФАН СССР, вып. 7, 1953.

Л. В. ПОПОВ, В. И. ШУБИН

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОЧВЫ НА ВЫРУБКАХ В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ЗОНЕ

Значение температурного режима почвы для жизни растений, в том числе для прорастания семян и роста всходов, широко освещено в экологической и агрономической литературе. Влияние различных приемов обработки почвы на температурный режим верхних ее горизонтов также довольно подробно рассматривается в работах по агрономии, метеорологии и экологии. В лесоводственной же литературе эти вопросы освещены весьма слабо. В современных отечественных учебниках по лесным культурам [1, 2] указания на значение температуры почвы для лесовыращивания вовсе отсутствуют.

При лесокультурных работах обычно учитывается влияние различных причин на температуру воздуха; из факторов, определяющих температурный режим почвы, в лучшем случае, принимается во внимание характер растительного покрова. Лесоводы, как правило, не учитывают зависимость температуры почвы от наличия лесной подстилки, ее свойств и состояния. К тому же такой учет труден, так как отечественная лесоводственная литература располагает более чем скромными данными по этому вопросу [3, 4]. В иностранных изданиях [5—12] можно найти также лишь разрозненные наблюдения, проведенные в большинстве случаев попутно с изучением влияния на температуру почвы других компонентов среды.

В наших учебниках по лесоводству вопрос о специфических тепловых свойствах лесной подстилки или не рассматривается [13, 14] или освещен со значительными ошибками. Так, Г. Ф. Морозов [15] и В. Г. Нестеров [16] утверждали, что лесная подстилка обладает большой теплоемкостью, хотя известно, что удельная теплоемкость веществ, составляющих ее, приблизительно в два раза меньше, чем воды [17, 18], а объемная теплоемкость сухой подстилки в десять раз меньше весовой (удельной); так как вещество подстилки занимает в ней около 8—12% объема, в то время как объемная теплоемкость минеральных горизонтов почв близка к 0,3. Следовательно, теплоемкость подстилки ни в какой мере нельзя считать большой.

Воздействие различных компонентов среды на температуру почвы изменяется по климатическим и растительным зонам. Вследствие этого данные, полученные в одной зоне, далеко не всегда могут быть использованы в других. Во всяком случае, такое использование возможно только с известными оговорками или приближениями.

Помещая здесь цифровой материал, имеющий ограниченное зональное значение, мы стремились обратить внимание лесоводов на актуальность изучения влияния подстилки на температуру почвы и отметить некоторые особенности этого влияния, которые могут наблюдаться и в других зонах.

Исследование проводилось в северо-западной части среднетаежной зоны нашей страны (по геоботаническому районированию 1947 г. — в Карело-Финском юго-восточном округе Восточно-Европейской провинции Евразийской таежной области).

Целью работы было выяснить влияние лесной подстилки на температуру тех слоев почвы, в которых прорастают семена и развиваются корни всходов сосны.

Одновременно нами получены данные, правда весьма скромные, о влиянии рельефа на температуру почвы на вырубках.

Семена сосны высеваются на глубину 1—2 см, при естественном обсеменении прорастание их происходит обычно на поверхности почвы. Корни всходов развиваются в верхнем 10-сантиметровом слое почвы. Заметное влияние на рост всходов и сеянцев оказывает температура воздуха непосредственно у поверхности почвы (назовем ее температурой на поверхности почвы).

Температура почвы измерялась термометрами Савинова, а на поверхности почвы — фиксирующими термометрами. Наблюдения проводились в 13 часов.

Объектами наблюдений были следующие участки:

Опытный участок 1. Сплошная концентрированная вырубка первого года из-под ельника-черничника. Рельеф: западный склон 2—3°. Почва сильноподзолистая, маломощная, супесчаная, скелетная. Лесная подстилка рыхлая, слаборазложившаяся, темно-бурая, дифференцирована на два подгоризонта (A_0^3 не выражено). Мощность ее $3,8 \pm 0,81$ см. В абсолютно сухом состоянии она имеет объемный вес $0,08 \pm 0,011$.

Опытный участок 3. Сплошная концентрированная вырубка первого года из-под кислотно-черничного ельника. Рельеф: верхняя пологая часть склона друмлины северо-восточной экспозиции. Почва среднеподзолистая, среднемощная, супесчаная на слоистом наносе. Лесная подстилка рыхлая, слаборазложившаяся, бурая. В ней ясно различимы два подгоризонта (A_0^3 не выражено). Мощность подстилки $3,2 \pm 0,49$ см, объемный вес $0,08 \pm 0,012$.

Опытные участки 5, 6, 7, 8 заложены на сплошной концентрированной вырубке из-под ельника-черничника. Почва сильноподзолистая, маломощная, супесчаная. Лесная подстилка рыхлая, слаборазложившаяся, дифференцирована на два подгоризонта. Мощность подстилки пятого опытного участка 3,0—4,0 см, шестого — 3,5—5,0 см, седьмого — 3,5—4,5 см, восьмого — 4,0—5,0 см.

Опытные участки 5, 6, 7, 8 расположены близко друг от друга на следующих элементах рельефа: пятый — южный склон радиального оза крутизной до 30° (высота оза от 12 до 15 м), шестой — северный склон этого же оза, седьмой — выровненная вершина моренной гряды (высота гряды около 30 м), восьмой — у подножия пологого северо-восточного склона моренной гряды.

Ни один из опытных участков не имеет затенения стенами леса, недорубами, семенниками или остатками подлеска.

Все опытные участки заложены в Виданском лесничестве Петрозаводского лесхоза Карельской АССР. Географические координаты места работ: $61^{\circ}59'$ с. ш. и $43^{\circ}35'$ в. д.

На опытном участке 1 наблюдения за температурой почвы проводились в течение 20 дней — с 15 июня по 4 июля 1952 г.

Варианты наблюдений: 1) подстилка A_0 не нарушена (контроль), 2) подстилка A_0 и A_1/A_2 перемешаны на глубину 15 см площадками 1×1 м, 3) подстилка A_0 снята площадками 1×1 м.

Результаты наблюдений (табл. 1) показывают, что поверхность подстилки нагревается сильнее, чем поверхность обработанных площадок, и падение температуры с глубиной в подстилке более резкое, чем в минеральном горизонте почвы.

Таблица 1
Температура почвы (в °С) на опытном участке 3
(в среднем из 20 измерений)

Варианты обработки почвы	Температура на глубине, см				
	на поверхности	2	5	10	15
Контроль	42,2±5,1	24,6±1,3	10,8±0,6	15,1±0,8	14,3±0,2
A ₀ и A ₁ /A ₂ перемешаны	31,8±3,5	26,3±2,4	19,0±1,1	16,1±0,6	14,8±0,3
A ₀ снята	31,4±3,7	25,1±2,1	18,9±1,1	16,1±0,5	14,5±0,3

В 1953 г. измерения температуры проводились на опытном участке 3 с 7 июня по 28 августа. Расположение станций показано на рис. 1.



Рис. 1. Расположение станций для измерения температуры почвы на опытном участке 3.

Температура измерялась на площадках площадью 1×1 м со следующей обработкой: 1) подстилка обгорела; 2) подстилка не нарушена (контроль); 3) подстилка и A₁/A₂ перемешаны на глубину 15 см; 4) подстилка снята.

За неимением достаточного количества термометров не представлялось возможным проводить наблюдения с повторностями в течение всего периода работы. Однако однократные измерения могут дать неправильное представление о температуре почвы, так как выбор мест наблюдений может оказаться неудачным.

Чтобы проверить, удачен ли выбор мест наблюдений, и установить, насколько правильно однократные наблюдения отражают изменения

температуры почвы под влиянием обработки, было проведено краткосрочное дублирование измерений с 7 по 16 июня 1953 г. на таких же площадках опытного участка, но в другой его части (табл. 2).

Таблица 2
Сравнение результатов дублированных измерений температуры на участке 3
(средние за 10 суток)

Варианты обработки почвы	Повторность	Температура на поверхности почвы, °С			Температура почвы на глубине, см, °С			
		макс.	мин.	срочная в 13 часов	1	5	10	15
Контроль	I	41,8	7,1	35,6	27,1	17,0	15,3	13,4
	II	40,9	6,0	34,8	26,3	16,8	15,3	13,4
A ₀ и A ₁ /A ₂ перемешаны	Расхождение I	0,9	1,1	0,8	0,8	0,2	0,0	0,0
	II	35,5	6,5	27,8	29,6	20,5	18,2	13,2
A ₀ снята	Расхождение I	0,9	0,9	0,7	0,7	0,3	0,1	0,1
	II	31,2	9,8	25,3	23,5	19,8	16,6	13,5
Расхождение		0,9	1,1	0,9	0,6	0,3	0,2	0,1

Как видно из табл. 2, между повторностями имеются довольно заметные расхождения. Несмотря на это, различие температурных условий по вариантам обработки проявляется вполне отчетливо, так как оно в общем значительно больше, чем расхождение между повторностями. Это дает основание считать, что различие в температурных условиях между вариантами обработки выявляется достаточно достоверно при наблюдении без повторностей.

Результаты измерений температуры на опытном участке 3 сведены в табл. 3.

Таблица 3
Средние температуры (°С) на участке 3 за период с 7 июня по 28 августа 1953 г.

Варианты обработки почвы	Температура на поверхности почвы				Температура почвы в 13 часов на глубине, см			
	срочная в 13 час.	максимальная	минимальная	суточная амплитуда	1	5	10	15
A ₀ обгорела	—	38,9±7,8	3,1±4,1	35,4±9,9	22,4±6,6	16,6±2,3	15,2±1,6	14,5±1,5
Контроль	26,0±8,7	35,9±9,0	7,2±3,4	28,6±5,8	20,7±5,8	16,4±2,1	15,5±1,6	14,3±1,5
A ₀ и A ₁ /A ₂ перемешаны	22,4±6,2	32,8±6,4	7,7±3,6	24,0±6,7	24,1±6,4	18,5±3,0	17,0±2,4	14,3±1,5
A ₀ снята	22,0±5,3	29,4±4,3	8,2±2,8	21,1±5,8	21,4±4,2	18,4±2,8	17,2±2,4	14,6±1,6

Однако средние значения температур недостаточны для характеристики температурных условий, тем более что различия в погодных условиях за такой сравнительно долгий период времени нивелирующе действуют на средние результаты наблюдений.

Температура почвы в 13 часов за период с 7 июля по 28 августа 1953 г. в °С

Варианты обработки почвы	Характер темпера-тур	Температуры средние из крайних на глубине, см					Крайние температуры на глубине, см				
		на по-верхности					на по-верхности				
		1	5	10	15	15	1	5	10	15	
Подстилка обгорела	Максимальная	38,3	20,1	17,5	16,7	—	45,0	21,1	18,1	17,6	
	Минимальная	10,9	12,2	12,1	11,7	7,3	12,5	10,5	10,0	9,8	
Контроль	Амплитуда	24,5	7,9	5,4	5,0	—	32,5	10,6	8,1	7,8	
	Максимальная	41,7	19,5	18,3	16,5	42,3	41,9	20,5	19,5	17,3	
А ₀ и А ₁ /А ₂ перемешаны	Минимальная	14,3	12,3	12,5	11,4	11,4	11,9	10,5	10,3	9,8	
	Амплитуда	27,4	7,2	5,8	5,1	30,9	30,0	10,0	9,2	7,5	
Подстилка снята	Максимальная	32,5	23,1	21,1	16,6	38,6	41,0	25,5	22,7	17,7	
	Минимальная	13,9	12,6	12,3	11,6	11,3	12,7	10,9	10,5	11,2	
Подстилка снята	Амплитуда	18,6	10,5	8,8	5,0	27,3	28,3	14,6	12,2	6,5	
	Максимальная	30,5	22,6	20,9	17,0	34,1	31,0	24,5	22,0	17,9	
Подстилка снята	Минимальная	14,0	13,7	13,2	11,1	10,9	12,0	10,8	10,1	9,3	
	Амплитуда*	16,5	8,9	7,7	5,9	23,2	19,0	13,7	11,9	8,6	

Чтобы лучше представить варьирование температур, введем условное понятие «крайние температуры», под которыми будем понимать все температуры, отличающиеся от среднего арифметического значения своего ряда более чем на одно среднее квадратичное отклонение σ .

Поскольку в пределах $M \pm \sigma$ заключается 68,3% всех значений каждого ряда, то на долю крайних максимальных и минимальных температур придется приблизительно по 15% всех значений каждого ряда. Нахождение средних арифметических значений крайних температур позволяет более наглядно показать особенности температурного режима (табл. 4).

В табл. 5 приведены абсолютно крайние температуры за сезон. Показательно, что все указанные в этой таблице крайности температур приходятся на июнь.

Таблица 5

Абсолютно крайние температуры (°С) на поверхности почвы за период с 7 июня по 28 августа 1953 г. по показаниям фиксирующих термометров

Варианты обработки почвы	Максимальная	Минимальная	Абсолютная амплитуда за сезон
А ₀ обгорела	+56,4	-8,8	65,2
Контроль	+53,5	-1,8	55,3
А ₀ и А ₁ перемешаны	+48,6	-1,4	50,0
А ₀ снята	+40,4	+0,5	39,9

Помещенные в табл. 1, 3, 4, 5 данные показывают, что температура на поверхности подстилки очень динамична. Обгорание подстилки увеличивает колебания температур, что обусловлено темной окраской обгоревшей подстилки. Это установили для минеральных горизонтов почвы Яковлев (см. [17]), Р. Ф. Дабенмайр [19] и П. Г. Адерихин [20, 21].

На поверхности площадок, где подстилка снята или перемешана с минеральным горизонтом, температура изменяется в более узких пределах, чем на поверхности подстилки, в основном из-за различия в максимальных температурах.

На глубине 1 см в подстилке температура ниже и менее изменчива, чем на поверхности. На площадках со снятой подстилкой температура на глубине 1 см в 13 часов мало отличается от таковой на поверхности, но варьирует заметно слабее.

В перемешанном с подстилкой слое супеси на глубине 1 см температура в 13 часов несколько выше и колеблется сильнее, чем на поверхности. Подобное явление при разрыхлении глинистых почв наблюдал Нитш (см. [22]); на песчаных почвах Бузулукского бора — А. П. Гольский [23].

Температура почвы на глубине 5 см под подстилкой ниже и менее изменчива, чем на обработанных площадках. На глубине 10 см это различие сохраняется, но в меньшей степени. На глубине 15 см различий в температурных условиях между вариантами обработки не наблюдается.

Не останавливаясь на причинах всех замеченных явлений (так как это не входит в задачу статьи), отметим основную особенность тепловых свойств подстилки.

На плохую теплопроводность подстилки указывали Ф. Вагнер [24], В. О. Петров [25], Н. А. Казанский [26]. Причина плохой теплопроводности

сти подстилки, находящейся в сухом состоянии, — в рыхлости и большой порозности ее.

В природных условиях почва всегда содержит какое-то количество влаги. Согласно исследованиям А. Ф. Чудновского [27], из всех факторов, определяющих тепловые свойства почвы, наибольшее значение имеет ее влажность.

А. Ф. Чудновский определил, что при увеличении влажности от нуля до максимума теплопроводность почвы увеличивается сначала быстро, затем рост ее замедляется, приближаясь постепенно к теплопроводности воды; теплоемкость почвы возрастает медленно, но неуклонно. Температуропроводность изменяется, как известно, в прямой зависимости от теплопроводности и в обратной от теплоемкости. Поэтому с увеличением влажности почвы, когда теплоемкость ее еще мала, а теплопроводность быстро возрастает, температуропроводность резко повышается. При достижении некоторой сравнительно невысокой влажности, когда рост теплопроводности замедляется, температуропроводность, достигнув максимума, начинает постепенно уменьшаться в связи с неуклонным ростом теплоемкости.

Данные А. Ф. Чудновского показывают, что чем больше порозность почвы, тем слабее увеличивается ее теплопроводность при повышении влажности. Вместе с тем очевидно, что изменение теплоемкости при увеличении влажности не зависит от свойств почвы (кроме диапазона влажности ниже максимальной гигроскопичности, когда в почве имеется только лишь связанная вода). Поэтому при увлажнении почв с большей порозностью следует ожидать менее резкого увеличения их температуропроводности и невысокого максимального значения ее по сравнению с почвами, обладающими малой порозностью. А поскольку порозность лесной подстилки очень большая, то можно предполагать, что температуропроводность ее слабо возрастает при увеличении влажности и всегда остается сравнительно низкой.

Данных о зависимости температуропроводности подстилки от ее влажности в литературе, видимо, нет. Указание В. З. Гулисавили [28] на то, что температуропроводность сырой подстилки меньше, чем сухой, неубедительно, так как он пользовался очень слабым источником тепла; кроме того, сведения о влажности испытанной им подстилки не приведены.

Рассмотрим теперь, насколько наблюдавшиеся нами температуры благоприятны для появления и роста всходов сосны.

Работами ряда авторов [29—32] установлено, что крайними температурами для прорастания семян сосны являются $+7$ — $+8^\circ$ и $+34$ — $+37^\circ$. Крайние температуры для прорастания семян, взятых из разных климатических условий, несколько разнятся, как это было установлено экспериментами М. Кенитца [33], однако это различие невелико и не выходит за указанные выше пределы.

В природной обстановке семена прорастают при изменяющейся температуре, поэтому в данном случае больший интерес представляет влияние переменных температур на прорастание.

Хаак [31, 34] указывал, что небольшие колебания температуры не влияют на прорастание семян сосны.

С. А. Самофал [35], основываясь на результатах эксперимента, писал, что небольшие колебания температуры стимулируют прорастание. В его опыте семена сосны, лиственницы и особенно березы лучше прорастали при колебании температуры от $+20^\circ$ до $+25^\circ$, чем при постоянной температуре $+20^\circ$. Такой опыт, впрочем, не доказывает благоприятного влияния колебаний температуры, по крайней мере в отношении

семян сосны, так как температура колебалась в сторону оптимума и средняя поэтому была несколько ближе к нему.

За сорок три года до указанной работы С. А. Самофала Л. И. Яшинов [30] определил, что колебания в среднем в 5° убыстряют и улучшают прорастание семян сосны даже при некотором снижении средней температуры (ниже оптимума).

Благоприятное влияние небольших колебаний температуры на прорастание семян древесных пород наблюдалось также в опытах Швапах и Цедербауэра (см. [36]).

Л. И. Яшинов [30] не ставил цели выяснить влияние на прорастание семян больших амплитуд температуры. Однако из его данных видно, что увеличение амплитуды температур до 10° и более в пределах между оптимумом и минимумом и особенно ниже минимума значительно ухудшает прорастание.

Сравним температуры на поверхности почвы при различной ее обработке (см. табл. 3—5) с диапазоном температур, при которых может происходить прорастание семян. Для сравнения построен график (рис. 2).

Как видно из данных таблиц и графика, средние максимальные и минимальные температуры на поверхности подстилки совпадают с критическими температурами для прорастания семян. Но общее колебание температур в начале лета гораздо больше, и на поверхности подстилки в большинстве случаев температура неблагоприятна для прорастания семян сосны как ночью, так и днем. Обгорание подстилки ухудшает температурные условия на ее поверхности.

На площадках со снятой подстилкой температура колеблется в более узких пределах; максимальные температуры для прорастания семян температуры, а минимальные в среднем несколько выше нижней критической. Это показывает, что на поверхности площадок со снятой подстилкой температурные условия для прорастания семян сосны лучше, чем на поверхности подстилки.

На поверхности рыхлого, перемешанного с подстилкой слоя супеси, температурные условия несколько лучше, чем на поверхности подстилки, но хуже, чем при снятии ее.

Отсутствие данных об амплитудах суточных колебаний температуры на глубине 1 см не позволяет сделать вполне определенных заключений о влиянии этих колебаний на прорастание семян. Следует только заметить, что на этой глубине в подстилке и в супеси при удалении подстилки температурные условия для прорастания семян лучше, чем на поверхности, чего нельзя сказать о рыхлом перемешанном с подстилкой слое супеси.

Рассмотрим кратко, насколько наблюдавшиеся нами температуры благоприятны для роста всходов.



Рис. 2. Амплитуды температур на поверхности почвы в сравнении с диапазоном температур, при которых семена сосны прорастают.

Варианты обработки: ГАРЬ — подстилка обгорела, К — контроль, III — A_0 и A_1/A_2 перемешаны, IV — подстилка снята.

Для всходов сосны более опасны, видимо, высокие температуры. М. И. Сахаров [4] указал, что при температуре $+40 - +45^\circ$ нарушается водный баланс всходов сосны, это приводит к гибели их или, в лучшем случае, значительно ухудшает их рост.

Во время исследования температуры выше $+50^\circ$ неоднократно наблюдались в июне на поверхности подстилки, в особенности, если она обгорела. На площадках, где подстилка перемешана с минеральным горизонтом, температура выше $+45^\circ$ отмечена лишь однажды. На площадках со снятой подстилкой температура ни разу не поднималась выше $+41^\circ$.

То же следует сказать о крайних низких температурах. В июне на поверхности подстилки отрицательные температуры наблюдались неоднократно. При перемешивании подстилки с минеральным горизонтом случаи отрицательных температур в июне единичны. На поверхности площадок со снятой подстилкой температура в июне не опускалась до 0° . Это говорит о том, что температурные условия на поверхности подстилки неблагоприятны для роста всходов. Существенное улучшение этих условий происходит при снятии подстилки.

Чтобы проверить в нескольких иных условиях результаты наблюдений прошлых лет и получить некоторый цифровой материал о влиянии рельефа на температуру верхнего слоя почвы, в летний период 1955 г. измерения температуры проводились на опытных участках 5—8.

Температура измерялась на поверхности почвы и на глубине 1 см.

На опытных участках 5 и 6 наблюдения проводились с трехкратной повторностью в двух вариантах: на площадках, где подстилка удалена, и на площадках, где она перемешана с верхним минеральным горизонтом на глубину 15 см. На опытных участках 7 и 8 наблюдения велись только на площадках со снятой подстилкой.

Результаты измерений (табл. 6 и 7) подтверждают ранее полученные данные о влиянии обработки на температуру верхнего слоя почвы и показывают, что температура на глубине заделки семян на южном склоне (опытный участок 5) в полтора раза выше, чем на северном (опытный участок 6). На южном склоне в июне температура на глубине 1 см приближается к оптимальной для прорастания семян сосны.

Однако это, казалось бы, положительное влияние повышения температуры в действительности не улучшает условий для прорастания семян. Дело в том, что на южном склоне, сильнее обогреваемом, почва быстрее иссушается (табл. 8), а повышение температуры при низкой влажности почвы, как установлено Р. Г. Кинти [37], приводит к сильному расходованию эндоспермы семян сосны на транспирацию.

Колебания температуры на поверхности площадок также более значительны на южном склоне, чем на северном. Вызывается это тем, что на участках южной экспозиции, по сравнению с остальными, более высокие максимальные температуры. Минимальные температуры на разных элементах рельефа различаются мало; у подножья северо-восточного склона (опытный участок 8) они несколько ниже, чем на других участках.

Различие в температурах на глубине 1 см между плоской вершиной моренной гряды (опытный участок 7) и южным склоном (опытный участок 5) больше, чем между плоской вершиной моренной гряды и северным склоном (опытный участок 6). Это также говорит о том, что в данных условиях в летние месяцы температурный режим верхнего слоя почвы зависит в большей степени от максимальных, чем от минимальных температур.

Таблица 6

Средние суточные амплитуды температур и абсолютно крайние температуры на поверхности почвы по показаниям фиксирующих термометров ($^\circ\text{C}$)

Опытные участки	Способ обработки почвы	Июнь				Июль				Август			
		максимальная	минимальная	амплитуды		максимальная	минимальная	амплитуды		максимальная	минимальная	амплитуды	
				абсолютная	средняя суточная			абсолютная	средняя суточная			абсолютная	средняя суточная
5	A_0 и A_1/A_2 перемешаны	+46,5	—	—	—	+52,5	+1,0	51,5	34,2	+48,2	-0,9	49,1	30,4
	A_0 снята	+47,8	-3,0	50,8	31,6	+50,0	+2,1	47,9	30,4	+50,8	-0,1	50,9	30,1
6	A_0 и A_1/A_2 перемешаны	+41,8	-3,0	44,8	28,2	+47,7	+0,5	47,2	28,7	+46,0	-1,2	47,2	27,6
	A_0 снята	+36,7	-2,7	39,4	22,7	+36,0	-0,1	36,1	21,2	+34,6	+0,4	34,2	19,1
7	A_0 снята	—	—	—	—	+34,7	-1,3	33,4	22,1	+38,6	0,0	38,6	22,2
	A_0 обгорела	—	—	—	—	+52,7	—	—	—	+45,5	—	—	—
8	A_0 снята	—	—	—	—	+35,9	-1,6	37,5	23,5	+42,8	-2,0	44,8	23,0

Таблица 7
Средние декадные температуры почвы на глубине 1 см
(по наблюдениям в 13 часов)

Способ обработки почвы	Июнь		Июль			Август			Средняя за сезон
	вторая декада	третья декада	первая декада	вторая декада	третья декада	первая декада	вторая декада	третья декада	
Опытный участок 5									
A_0 и A_1/A_2 перемешаны	19,0	23,6	28,7	31,0	26,5	25,7	38,1	27,2	27,5
Подстилка снята	20,0	25,2	28,3	30,3	26,5	25,5	37,0	27,2	27,6
Опытный участок 6									
A_0 и A_1/A_2 перемешаны	14,4	16,9	21,1	20,8	17,7	18,9	21,1	17,2	18,5
Подстилка снята	14,3	17,7	20,4	20,3	17,2	18,8	12,9	17,0	18,2
Опытный участок 7									
Подстилка снята	—	—	23,6	22,2	20,4	21,1	25,2	21,7	—

Таблица 8
Влажность почвы (% от объема) на глубине 1 см
в июне 1956 г.

Способы обработки почвы	Опытный участок 5	Опытный участок 6
A_0 снята	7,0	10,1
A_0 и A_1/A_2 перемешаны	5,3	6,9

Выводы

1. Температура на поверхности подстилки на вырубках подвержена весьма сильным колебаниям, что неблагоприятно для прорастания семян и развития всходов сосны. То же самое наблюдается на глубине 1 см в подстилке, хотя и в несколько меньшей степени.
2. Обгорание верхней части подстилки способствует еще большему ухудшению температурных условий на ее поверхности и на глубине 1 см.
3. Снятие подстилки приводит к существенному улучшению температурных условий для появления и роста всходов сосны.
4. Перемешивание подстилки с верхним минеральным горизонтом несколько улучшает температурные условия на поверхности и на глубине 1 см, однако не столь значительно, как при снятии лесной подстилки.
5. Вопреки довольно широко распространенному мнению, что в среднетаежной подзоне прорастающие семена и всходы древесных пород могут страдать лишь от крайних низких температур, проведенные наблюдения показывают, что не менее вредными для появления и роста всходов могут быть также крайние высокие температуры на поверхности подстилки и в верхнем ее слое.
6. Можно предполагать, что в рассматриваемых условиях влияние рельефа на температуру верхнего слоя почвы в летние месяцы наиболее сильно проявляется по отношению к максимальным температурам.

Восточно-Сибирский филиал
Академии наук СССР
Карельский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28/XI 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Оглевский, Лесные культуры. М.—Л., 1949.
2. Е. П. Заборовский, Лесные культуры. Л., 1949.
3. Н. Е. Декатов, Температурные колебания в различных условиях лесной обстановки Ленинградской области и влияние на возобновление ели. Исследования по лесоводству, Л., 1936.
4. М. И. Сахаров, Климатическая неоднородность сплошных вырубок в сосняках и ее значение для естественного возобновления сосны. Изв. АН БССР, № 3, 1951.
5. M. E. Wolln, Untersuchungen über Temperatur und Verdunstung des Wassers in verschiedenen Bodenarten, Landwirtschaft Lehrbücher von Nathurius und Thiel, Bd. 4, 1875.
6. F. Shreve, Soil temperature as influenced by altitude and slope exposure. Ecology, № 5, 1924.
7. F. Shreve, Soil temperatures in redwood and hemlock forest. Bull. Torrey Botan. Club, 54, 1927.
8. J. W. Toumey and E. J. Neethling, Insolation, a factor in the natural regeneration of certain conifers. Royal Univ. School of Forest Bull., II, 1924.
9. A. L. Mac Kinney, Effect of forest litter on soil temperature and soil freezing in autumn and winter. Ecology, № 10, 192.
10. S. E. Multamäki, Kunsen taimien polettuminen ja sen vaikutus ojitettujen soiden metsittymiseen. Acta forestalia fennica, 51 (1), 1946.
11. O. Vaartaja, High surface soil temperatures on methods of investigation and thermocouple observation on a wooded heath in Hie South of Finland. Oikos, № 1, 1949.
12. O. Vaartaja, Temperature and evaporation at and near ground level on certain forest sites. Canadian J. of Botany, vol. 32, № 6, 1954.
13. М. Е. Ткаченко, Общее лесоводство. 1-е изд. М.—Л., 1939.
14. М. Е. Ткаченко, Общее лесоводство. 2-е изд. М.—Л., 1952.
15. Г. Ф. Морозов, Обоснования учения о лесе. Симферополь, 1920.
16. В. Г. Нестеров, Общее лесоводство, М.—Л., 1949.
17. Н. М. Сибирцев, Избр. соч., т. I, Почвоведение. М., 1951.
18. И. В. Тюрин, Курс почвоведения. М.—Л., 1933.
19. R. F. Douben mire, Temperatures gradients near the soil surface with reference to techniques of measurement in forest ecology. J. of Forestry, vol. 41, 1943.
20. П. Г. Адерихин, К вопросу о влиянии цвета почвы на ее нагреваемость. Тр. Воронежск. гос. ун-та. Новые сообщения и рефераты, т. XXVIII, 1953.
21. П. Г. Адерихин, Влияние цвета почвы на ее температуру. Тр. Воронежск. гос. ун-та, т. XXVI, 1954.
22. Г. А. Герасимов, Действие обработки и удобрения на температуру и влажность почвы. Тр. Пермского с.-х. ин-та, т. VII, вып. 2, 1939.
23. А. П. Тольский, О влиянии пахоты и рыхления почвы на ее температуру. Тр. опытных лесничеств, вып. 2, 1904.
24. F. Wagner, Untersuchungen über das relative Wärmeleitungsvermögen verschiedener Bodenarten. Wollny Forschungen, Bd. 7, 1883.
25. В. О. Петров, О теплопроводности некоторых почв. Материалы по изучению русских почв, вып. VIII, 1893.
26. Н. А. Казанский, Опыты по изучению влияния огня на возобновление ели. Исследования по лесоводству, М.—Л., 1931.
27. А. Ф. Чудновский, Физика теплообмена в почве, Л., 1948.
28. В. З. Гулисашвили, Опыты по изучению влияния огня на возобновление леса. Исследования по лесоводству, М.—Л., 1931.
29. Tietz, Über die Keimung Laubhölzer bei verschiedenen aber constanten Temperaturen, Berlin, 1874.
30. Л. И. Яшинов, О влиянии температуры на прорастание семян некоторых хвойных древесных пород. Изв. Петровской земледельческой и лесной академии, М., 1883.
31. Naasck, Die Prüfung der Kiefern Samen. Z. für Forst und Jagdwesen, 1912.
32. E. Mork, Über die Bedeutung der Temperatur für die Jungung in den Fichtenwäldern von nord-Tröndelag. Meddelelser fra Det norske Skogforsöksvesen, № 16, 1933.
33. M. Kienitz, Vergleichende Keimversuche mit Waldsamen. Forstliche Blätter, H. 1, 1880.
34. Naasck, Der Kiefern Samen. Z. für Forst und Jagdwesen, 1909.
35. С. А. Самофал, Энергия прорастания и всхожесть лесных семян. Тр. по лесному опытному делу Украины, вып. 6, 1926.
36. Н. Я. Яковлев, Влияние времени производства лесных культур на их успешность. Лесное хозяйство и лесозащита, № 2, 1936.
37. R. G. Kintigh, Some Effects of Temperature on Germination and Development of Pinyon Pine. J. of Forestry, vol. 47, № 8, 1949.

А. П. РОМАНОВА

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА БАКТЕРИОПЛАНКТОНА,
ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛА

Бактериальное население оз. Байкал оставалось до сих пор почти неизученным. Микробиологические исследования на Байкале проводились эпизодически: с 1927 г. до настоящего времени опубликовано всего пять работ [1—5].

Начало выяснению значения микроорганизмов в круговороте веществ в Байкале было положено работами Н. Б. Нечаевой и А. Г. Родиной [2,4]. Распределения общего количества бактерий в воде оз. Байкал касаются недавние работы С. И. Кузнецова [3] и А. Г. Родиной [4]. К сожалению, их исследования обобщают наблюдения всего одного-двух летних месяцев.

В последние десятилетия получено много фактического материала, вскрывающего опомную роль микроорганизмов в многообразных превращениях и синтезе веществ в водоемах.

Как установлено работами А. Г. Родиной [6—11], бактерии являются полноценным пищевым материалом для животного населения водоема. Поэтому изучение развития биомассы бактерий и их деятельности необходимо для выяснения закономерностей биологического продуцирования в водоеме.

В 1953—1954 гг. на оз. Байкал нами проводились исследования с целью выяснить основные закономерности в сезонных изменениях общего количества бактериопланктона, в его вертикальном и горизонтальном распределении, а также определить роль бактерий в круговороте важнейшего биогенного элемента — азота.

Местом микробиологических наблюдений был район мыса Сытый (западный берег Южного Байкала). Этот участок — типичный прибрежный район открытого Байкала. Прибрежные станции находились над глубинами 2,5 и 4 м, а станция в открытом озере над глубинами 700—800 м. Пробы на последней брались с 8—9-го горизонтов до глубины 300—400 м.

Определение общего количества бактериопланктона проводилось методом прямого счета по А. С. Разумову [12]. Нами использовались фабричные ультрафильтры № 2 и мембранные безбактериальные фильтры [13], изготовленные нами в лаборатории А. Е. Крисса. Подсчет микроорганизмов производился в 75—100 полях зрения.

Сезонные изменения количества бактерий в оз. Байкал

Исследования, проведенные в различные сезоны, показали, что в Байкале происходят закономерные изменения количества бактериопланктона в течение года. В годичном цикле изменения численности бактерий наблюдаются два максимума. Первый, ранневесенний, отме-

чен в апреле — первой половине мая; второй — в июле — августе или в начале сентября.

В апреле 1954 г. в открытой удаленной от берега части озера количество бактерий в слое 0—25 м колебалось в пределах 139—335 тыс. в 1 мл (табл. 1). После вскрытия озера, в мае, общее содержание бактерий в слое 0—25 м остается высоким в течение 1,5—2 декад. Затем наблюдается дифференциация содержания бактериопланктона в самом поверхностном и 5—25 м слоях. В слое 5—25 м постепенно снижается количество бактериопланктона и к концу мая опускается до 200—180 тыс. в 1 мл. В самом же поверхностном слое воды концентрация бактериопланктона остается высокой — до 300 тыс. в 1 мл, что, вероятно, связано с ветровыми нагонами вод вскрывшихся многочисленных притоков, богатых микроорганизмами. Можно предполагать, что ранневесеннее увеличение общего числа бактерий начинается в марте, т. е. несколько раньше того времени, когда производились наши исследования, так как в конце февраля и в марте начинается массовое развитие весенних форм фитопланктона.

Обычно в конце июня, иногда в первых числах июля наступает гомотермия при 3,6—3,7° во всей исследуемой толще воды. В это время отмечается рассеивание бактериопланктона в толще указанных слоев. Количество бактерий в слое 0—100 м снижается в среднем до 100 тыс. в 1 мл. Одновременно происходит рассеивание фитопланктона в толще воды и отмирание его весенних форм.

С установлением прямой стратификации температур и дальнейшим прогреванием верхних слоев воды число микроорганизмов быстро возрастает. В конце июля — августе, а в годы с запоздалым прогреванием вод в начале сентября наблюдается второй, более мощный, чем весенний, летний максимум развития бактериопланктона. Количество бактерий увеличивается в верхних горизонтах воды до 800—1000 тыс. в 1 мл.

Таблица 1
Сезонные изменения содержания бактерий (тыс. экз. в 1 мл) и температуры (°С) в воде открытой части озера в районе мыса Сытый (по данным 1954 г.)

Глубина, м	17/IV	24/IV	17/V	31/V	11/VI	12/VI	29/VII	16/VIII	30/VIII	17/IX	30/IX	15/X
0	297	0,3	316	300	4,2	287	961	780	448	468	427	280
5	139	1,3	191	221	3,6	—	1045	791	—	—	10,6	8,3
10	335	1,3	266	183	3,7	227	768	840	368	398	10,6	8,5
25	151	1,3	159	202	3,6	307	510	309	406	431	10,5	8,4
50	132	1,4	146	132	3,6	170	447	285	109	109	7,7	8,4
100	121	3,1	92	82	3,6	93	157	101	94	92	4,9	7,7
200	81	3,5	81	91	3,4	83	114	93	86	77	3,7	3,9
400	71	3,4	74	85	3,3	59	82	80	83	71	60	3,9

В это же время наблюдается второй максимум в развитии фито-планктона, представленного в этот период разнообразными теплолюбивыми формами. Однако этот максимум является количественно менее мощным, чем весенний.

К осени число микроорганизмов уменьшается, но общая плотность микронаселения остается еще довольно значительной. Максимальные количества микроорганизмов (430—655 тыс./мл) в сентябре были отмечены на глубине 10—25 м, т. е. в слоях наибольшего скопления как живого, так и отмирающего к этому времени фитопланктона. Высокая плотность бактериопланктона сохраняется благодаря органическим веществам отмирающего в массе фитопланктона. В дальнейшем наступающая осенняя циркуляция вод и жесткие штормы, господствующие в это время года, приводят к полному перемешиванию водной толщи и к рассеиванию в ней микроорганизмов. Количество бактерий в слое 0—100 м падает в среднем до 275 тыс./мл.

При рассмотрении полученных данных (табл. 1 и рис. 1) видно, что все сезонные изменения количественного содержания микроорганизмов охватывают в основном столб воды 0—100 м. В слоях 200—400 м расхождения в содержании бактериопланктона в различные сезоны года настолько малы, что можно говорить не о сезонных, а только микролокальных изменениях. Наиболее значительные сезонные изменения количественного содержания бактериопланктона наблюдаются в фотосинтезирующем слое 0—25 м. Так, например, число бактерий в слое до 5 м (0—5 м) увеличивается от весны к лету почти в 10 раз, на глубине 50 м — только в 4 раза, а на глубине 100 м — всего в 1,5 раза (табл. 1).

Таким образом, сезонные изменения содержания бактерий в Байкале подчинены определенным закономерностям: количество микроорганизмов возрастает очень сильно от весны, с момента установления режима гомотермии (июнь), к лету (конец июля — август), затем медленно убывает ко времени установления осенней гомотермии (середина октября). Новое значительное увеличение плотности бактериопланктона наступает ранней весной — в марте — апреле. Из двух максимумов в развитии бактерий в годовом цикле летний — наиболее высокий.

Относительно сезонных изменений содержания бактерий в водах литорали можно сказать, что здесь наблюдается общая закономерность — увеличение числа бактерий от весны к лету и последующее медленное снижение осенью (табл. 2).

Таблица 2
Содержание бактерий (тыс. экз. в 1 мл) в воде литорали у мыса Сытый в различное время 1954 г.

Горизонт	№ станции	16/IV	23/IV	18/V	29/V	12/VI	26/VI	12/VII	4/VIII	18/VIII	6/IX	29/IX	18/X
Поверхностный	1*	259	268	215	259	222	190	653	1567	824	264	629	277
Поверхностный	2**	232	200	335	297	197	291	555	1767	1300	327	555	304
Придонный	2	286	228	170	230	157	242	299	1353	1217	320	518	520

* Расположена над глубиной 2,5 м.
** Расположена над глубиной 4,5 м.

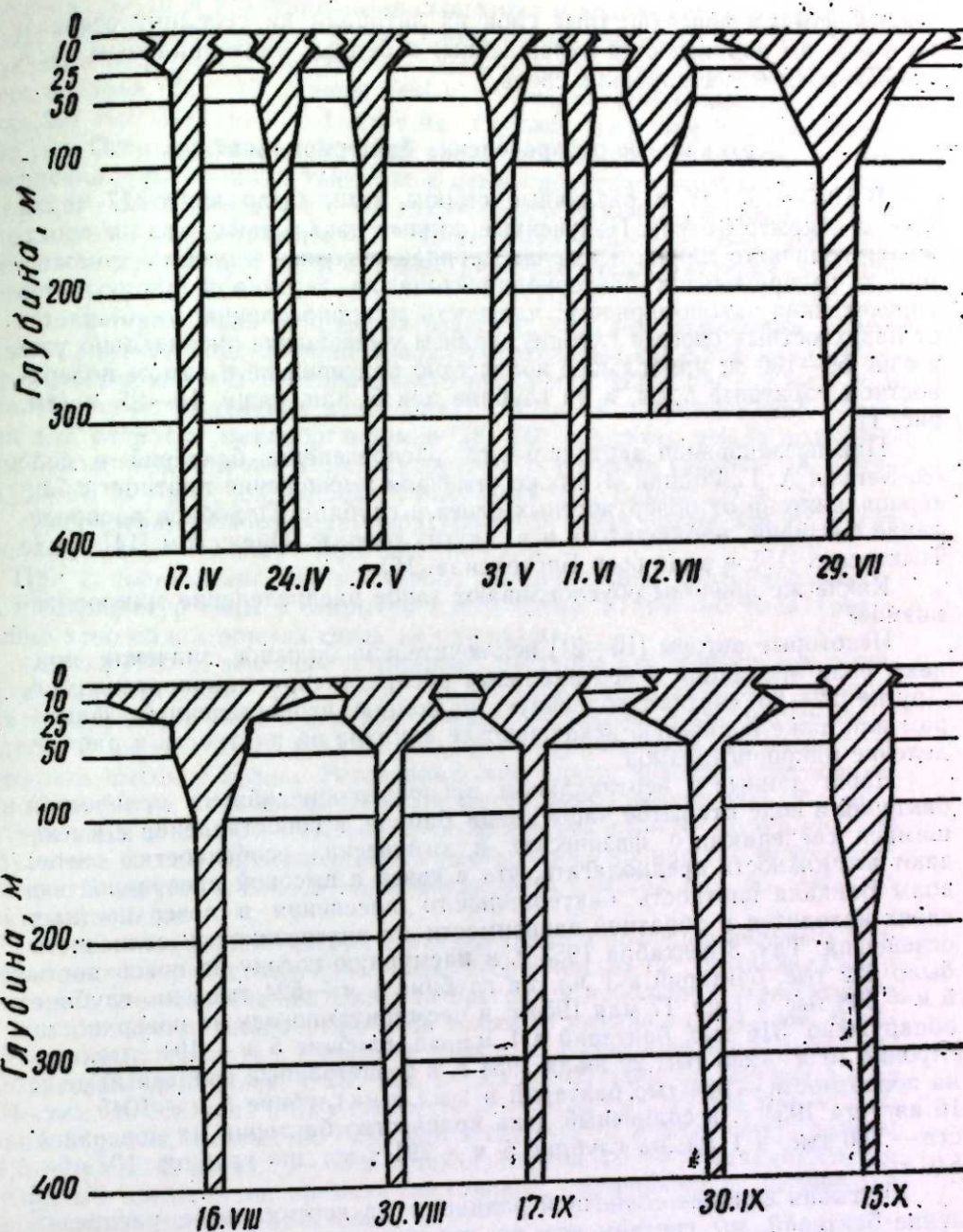


Рис. 1. Вертикальное распределение бактериопланктона в различное время 1954 г. (в 1 см по горизонтали 300 тыс./мл бактерий).

Плавный ход сезонного развития бактериопланктона литорали более часто и резко, чем в открытом Байкале, нарушается сгонно-нагонными ветрами. Как уже было отмечено А. Г. Родиной [4], содержание и вертикальное распределение микроорганизмов в воде литорали Байкала в штормовую погоду и после длительных ветров различны. Увеличение абсолютного числа микроорганизмов во всей толще воды литорали и обогащение поверхностного слоя бактериями связаны с нагоном ветрами вод притоков, богатых бактериопланктоном и фитопланктоном. Ветры, дуящие с берега, отгоняют более прогретые и насыщенные мик-

роорганизмами поверхностные слои из литорали на середину озера, и на смену им поднимаются охлажденные и бедные бактериальным населением воды более глубоких слоев.

Вертикальное распределение бактериопланктона

В 1953—1954 гг. в различные сезоны нами было взято 17 серий проб в открытом озере. Полученные данные показывают, что на протяжении годового цикла, исключая периоды весенней и осенней гомотермии, в распределении бактериопланктона по вертикали наблюдается определенная закономерность: плотность микронаселения уменьшается от поверхностных слоев в глубину, причем уменьшение значительно уже в слое 50—100 м; наибольшее количество бактерий не в самом поверхностном горизонте воды, а на глубине или 5, или, чаще, 10—25 м (см. рис. 1).

При исследовании вертикального распределения бактерий в воде оз. Байкал А. Г. Родина [4] также отмечала уменьшение плотности бактериопланктона от поверхностных слоев в глубину. Подобное распределение бактерий наблюдалось и в других озерах: Онежском [14], ряде Токсовских [15], в ряде озер Бисконсина [16].

Какие же причины обуславливают такое распределение микроорганизмов?

Некоторые авторы [16—21] исключительно большое значение придают роли инсоляции в вертикальном распределении микроорганизмов. Другие [22—26] считают солнечную радиацию второстепенным фактором или даже полностью исключают ее влияние на плотность и распределение микроорганизмов.

Наши данные о вертикальном распределении общего количества бактерий в воде открытой части озера Байкал, в сопоставлении с имеющимися сведениями о физических и химических особенностях озера, дают возможность предполагать, что в связи с высокой прозрачностью воды Байкала плотность бактериального населения в поверхностных слоях находится в обратной зависимости от интенсивности солнечного освещения. Так, 8 сентября 1953 г. в пасмурную погоду на поверхности было 622 тыс. бактерий в 1 мл, на глубине 1 м — 524 тыс., на глубине 5 м — 508 тыс. в 1 мл. 17 мая 1954 г. в пасмурную погоду на поверхности обнаружено 316 тыс. бактерий в 1 мл, на глубине 5 м — 191 тыс., на глубине 10 м — 286 тыс. 29 июля 1954 г. в безветренный солнечный день на поверхности — 964 тыс. бактерий в 1 мл, а на глубине 5 м — 1045 тыс. 16 августа 1954 г. в солнечный день количество бактерий на поверхности — 780 тыс. в 1 мл, на глубине 5 м — 791 тыс., на глубине 10 м — 840 тыс.

Учитывая влияние солнечной радиации на вертикальное распределение бактерий, мы считаем все же, что оно определяется в основном вертикальным распределением фитопланктона. М. М. Кожов [27] отмечает повышенное содержание диатомовых водорослей в слое 0—10 м, ранней весной. В это время мы наблюдали и характерное вертикальное распределение бактериопланктона: резко выделяется повышенным числом бактерий слой 0—10 м. Так, 24 апреля 1954 г. в поверхностном горизонте содержалось 228 тыс. бактерий в 1 мл, на глубине 5 м — 223 тыс., на глубине 10 м — 245 тыс., на глубине 25 м количество бактерий уменьшилось до 140 тыс. в 1 мл.

Фитопланктон, сконцентрированный первоначально в самом верхнем слое подо льдом, постепенно опускается в нижележащие слои и скапливается на глубине 5—10 м. Наблюдаемые в апреле под льдом на

глубинах 5—10 м бактериальные скопления и возникают, вероятно, благодаря концентрированию в этих слоях фитопланктона, так как действие солнечной радиации ранней весной ослаблено из-за толстого ледяного покрова. Так, 17 апреля 1954 г. в поверхностном слое насчитывалось 297 тыс. бактерий в 1 мл, а на глубине 10 м заметно больше — 335 тыс. Осенью при ослабленной солнечной радиации бактериальные скопления наблюдаются также не в самых поверхностных слоях воды, а в слое 10—25 м. Здесь же в это время отмечено и максимальное скопление живого и отмирающего в массе фитопланктона. Все это убедительно доказывает взаимосвязь распределения бактерий и водорослей.

Из литературных источников известно, что при отмирании фитопланктона поступающие в воду питательные вещества стимулируют интенсивный рост бактериального населения. Известно также, что и прижизненные выделения водорослей — хороший энергетический источник для развития микроорганизмов [28—30]. На связь между количеством бактериопланктона и фитопланктона указывают также К. А. Гусева [31], А. Е. Крисс [32], Зобелл и Мак-Ивен [26], Тэйлор [33] и др.

Рассмотрим значение температурного режима среды для развития микрофлоры в условиях открытого Байкала.

При сопоставлении вертикального распределения бактериопланктона и температуры воды в открытой части озера в течение года совершенно ясно видна прямая связь между ними.

Летом 1953 г. весенняя гомотермия наступила не в июне, как обычно, а в начале июля. К 3 августа наблюдался нормальный ход повышения температуры воды в верхнем слое, нормально шло прогревание вглубь. В августе этого года было много ветреных дней, на озере поднимались высокие волны. Установившаяся четкая прямая стратификация температур, отмеченная нами 3 августа, резко нарушилась, и температура воды в слое 0—10 м упала к 20 августа с 9—10° до 6,5—5,5°. В результате всего этого существенно уменьшилось количество микроорганизмов. В августе в слое 0—10 м обнаружено от 232 тыс. до 348 тыс. бактерий в 1 мл.

С восстановлением прямой стратификации и последовательным прогреванием поверхностных слоев воды в среднем до 12° увеличивалась и плотность микронаселения. Сначала прогрелся небольшой столб воды в 10 м и количество микроорганизмов возросло именно в этом слое. В поверхностном горизонте с 8 августа 1953 г. по 8 сентября этого года число бактерий увеличилось с 286 тыс. в 1 мл до 622 тыс., на глубине 5 м — с 348 тыс. до 508 тыс., а на глубине 10 м — с 232 тыс. до 394 тыс. в 1 мл. Таким образом, количество бактерий в слое 0—10 м возросло в среднем в 1,5—2 раза. В слоях 25—50 м с температурой 4,5—5°, оставшейся в указанный промежуток времени постоянной, изменений в количестве бактериопланктона не отмечено.

Дальнейшее прогревание все более глубоких слоев водной толши ведет к значительному увеличению численности микронаселения на данных горизонтах. Так, на глубине 10 м с повышением температуры с 8 по 19 сентября от 5,7 до 12,2° количество бактерий возросло с 394 тыс. в 1 мл до 626 тыс., а на глубине 25 м за то же время с увеличением температуры с 4 до 7° — с 226 тыс. до 585 тыс. в 1 мл.

В 1954 г. температура воды в открытом озере равномерно повышалась с 3,7 (в июне) до 16,4° (в середине августа). С плавным повышением температуры происходило быстрое и очень значительное в этом году увеличение плотности микронаселения. К 29 июля при температуре 12,9° число микроорганизмов достигло 1045 тыс. в 1 мл. В это же время

очень сильно понизилась прозрачность воды в открытом озере до глубины 6 м. К 15 октября температура упала до 8—8,5° в слое 0—100 м, и к этому же времени произошло снижение численности микроорганизмов и равномерное рассеивание их по всей толще стометрового слоя (см. табл. 1).

Таким образом, изменение температуры существенно влияет на динамику численности микроорганизмов.

Обратимся к другому фактору среды — содержанию в водоеме биогенных элементов.

По многолетним исследованиям К. К. Вотинцева [34], известно, что к началу вегетации количество биогенных соединений в зоне фотосинтеза в разные годы приблизительно одинаково. Тем не менее один год от другого существенно отличается количеством как фитопланктона, так и бактериопланктона. Следовательно, уже это ставит под вопрос решающее влияние данного фактора в условиях Байкала.

Сезонные колебания содержания биогенных элементов подчинены общему ходу развития биологических процессов и сводятся к двум годовым максимумам и минимумам. Минимальное содержание биогенных элементов связано с ранневесенним и летним максимумами в развитии фитопланктона. Но в Байкале обычно не наблюдается полного исчезновения биогенных элементов в зоне фотосинтеза, за исключением отдельных лет. Временное обеднение фотосинтезирующих слоев биогенными элементами ранней весной восполняется в мае — июне за счет разложения и минерализации отмирающих после весеннего максимума водорослей. Усиливающиеся после освобождения Байкала от льда конвекционные токи в связи с прогреванием воды от 0 до 4° способствуют перемешиванию водной массы и обуславливают более равномерное распределение биогенных элементов и выход их с глубинными водами на поверхность. Новое обогащение биогенными элементами фотосинтезирующей зоны после летнего максимума развития фитопланктона связано с поступлением их из глубинных слоев в результате сильных конвекционных токов, вызванных резким осенним охлаждением поверхностных вод, а также мощных вертикальных перемещений воды, обусловленных осенними штормами.

Рассмотрим динамику сезонного содержания в исследуемом 300-метровом слое важнейшего биогенного элемента — азота (в соединении NO_3).

В 1954 г. в середине апреля, в период максимального развития бактерио-и особенно фитопланктона не наблюдалось полного исчезновения нитратов из фотосинтезирующего слоя 0—25 м, лишь несколько уменьшилось их содержание — до 0,134—0,232 мг/л, при обычных 0,320 мг/л. На глубине 50—300 м количество нитратов составляло 0,288—0,304 мг/л.

Уже в середине мая благодаря поступлениям из нижележащих слоев содержание данного элемента увеличилось в слое 0—25 м до 0,304 мг/л, а в слое 50—300 м до 0,400 мг/л. В июне отмечено еще некоторое увеличение NO_3 в слое 0—25 м — до 0,352 мг/л. В июле началось массовое развитие летних форм фитопланктона, а также повторное значительное увеличение плотности бактериопланктона. Содержание NO_3 в фотосинтезирующих и нижележащих слоях в этот период значительно колебалось, что обусловлено, с одной стороны, усиленным потреблением азота фитопланктоном, а с другой — восполнением его содержания из нижележащих слоев и в результате деятельности бактерий. С середины августа до середины сентября 1954 г. количество NO_3 в слое 0—25 м упало до нуля. В это же время, как уже упоминалось, отмечалось сильное понижение прозрачности воды, связанное с исключительно высоким со-

держанием фито- и бактериопланктона. Однако уже 15 октября нитраты снова появились в слое 0—25 м.

Газовый режим оз. Байкал отличается чрезвычайной устойчивостью в годичном цикле. Хорошая аэрация наблюдается во всех слоях озера, большое насыщение кислородом водной толщи 0—500 м характерно как для летнего (более 100%), так и для зимнего (90—100%) времени [35—36].

Небольшие различия наблюдаются и в сезонных изменениях величины рН. Поэтому вряд ли как-то они могут влиять на динамику сезонного вертикального распределения бактериопланктона.

Таким образом, из рассмотренных физико-химических и биологических факторов существенное влияние на сезонное вертикальное распределение бактериопланктона оказывают температурный режим и сезонное развитие фитопланктона, причем это влияние сказывается главным образом на изменении численности микроорганизмов в верхних слоях — 10—25 м. Действие биогенных элементов и солнечной радиации на микрофлору в условиях Байкала имеет второстепенное значение.

При совместном влиянии всех перечисленных факторов на развитие бактерий воздействие каждого из них в различные сезоны года различно как по сравнению с действием другого, так и по абсолютной своей силе. Так, в период массового развития весенних форм водорослей при низких температурах воды (1—0,2°) в верхних слоях 0—25 м развитие фитопланктона является фактором доминирующим. В период летнего максимального прогрева вод и максимума развития летних форм фитопланктона в верхних слоях 0—50 м совместное влияние этих двух факторов огромно, но преобладает, по нашему мнению, влияние температуры.

О вертикальном распределении бактерий в воде литорали можно сказать следующее: в поверхностном и придонном слоях количества бактерий довольно часто были почти одинаковы. Такое распределение микроорганизмов обусловлено постоянным сильным перемешиванием всей водной толщи литорали.

Большие изменения вертикального распределения бактерий вызываются нагонами вод притоков и мелководий, влекущими, наряду с увеличением абсолютного числа бактерий во всей толще вод литорали, к особенно сильному обогащению бактериями поверхностного слоя. Подобное распределение микроорганизмов показано в табл. 3 (данные от 18 мая, 12 июля и 4 августа 1954 г.).

Поздней осенью, когда наступает отмирание и разложение бентических и опускающихся на дно планктонных водорослей, придонный слой воды становится более обогащенным бактериями (см. табл. 3, данные от 18 октября).

Таблица 3

Горизонтальное распределение бактерий (тыс. экз. в 1 мл) в поверхностном слое воды в районе мыса Сытый в различное время 1954 г.

Расстояние от берега, м	16/IV	23/IV	18/V	29/V	12/VI	26/VI	12/VII	4/VIII	18/VIII	6/IX	29/IX	18/X
5	259	268	215	259	222	190	653	1567	824	264	624	277
60—70	282	200	355	297	197	294	555	1767	1300	327	555	304
	17/IV	24/IV	17/V	31/V	11/VI	—	12/VII	29/VIII	16/VIII	—	30/IX	15/X
1500	297	228	316	300	99	—	287	964	780	—	427	290

В горизонтальном распределении микроорганизмов от побережья в открытое озеро мы не можем отметить какой-либо закономерности. При сравнении результатов наблюдений в прибрежной части озера и в открытом Байкале нами были отмечены два типа горизонтального распределения микроорганизмов. В первом случае количества бактерий у побережья и в открытом озере почти одинаковы. Это показали данные всех трех станций, полученные 16—17 апреля, 23—24 апреля, 29 и 31 мая, 15 и 18 октября 1954 г. (табл. 3). Во втором случае количество бактерий меньше в открытом озере и больше в прибрежной части, причем намечается тенденция к максимуму численности бактерий на станции, расположенной над глубиной 4 м, по сравнению со станцией, расположенной над глубиной 2,5 м. Это мы связываем с не совсем благоприятными условиями развития бактерий над малыми глубинами в связи с сильным воздействием прибоя и обедненным здесь животным и растительным населением бентоса.

Горизонтального распределения бактерий касались в своих работах С. И. Кузнецов [3] и А. Г. Родина [4]. С. И. Кузнецов наблюдал увеличение общего количества бактерий от берега в сторону открытого Байкала. А. Г. Родина пришла к выводу, что горизонтальное распределение бактерий зависит от направления ветров, вызывающих нагоны воды из притоков. В штилевую погоду она обнаружила наименьшие количества бактерий в открытом озере и наибольшие в прибрежной его части. Наши исследования показывают, что горизонтальное распределение бактерий не является постоянным и зависит в очень большой степени от направления, силы и продолжительности ветров. Могут создаться условия, когда наибольшее число бактерий будет в открытом озере (это наблюдал С. И. Кузнецов), и такие, когда наиболее обогащена микроорганизмами область литорали (наблюдение А. Г. Родиной); при определенных условиях количество микроорганизмов приблизительно одинаково в прибрежной части и в открытом озере (это отмечено в наших наблюдениях).

Выводы

1. В годовом цикле изменения численности бактерий наблюдаются два максимума: ранневесенний — в апреле — первой половине мая и летний — в конце июля — августе или в начале сентября. Особенно четко максимумы выражены в верхнем 25-метровом слое. При этом наибольшие количества бактерий наблюдаются, главным образом, не в самом поверхностном горизонте, а в слоях 5 и чаще 10—25 м. С глубиной плотность микронаселения уменьшается, причем значительное уменьшение наблюдается уже в слое 50—100 м.

2. Наиболее существенный фактор, определяющий вертикальное распределение бактериопланктона, — локализация живого и отмирающего фитопланктона.

3. Существует прямая связь количественного содержания бактериопланктона с температурой воды. Содержание бактериопланктона обычно увеличивается с повышением температуры.

4. В летние месяцы в слое 0—5 м проникающий сюда свет оказывает летальное действие на бактериопланктон.

5. В условиях Байкала с его огромными глубинами содержание в воде биогенных элементов, а также газовый режим озера и величины рН не ограничивают развитие бактериопланктона.

6. В воде литорали количества бактерий в поверхностном и придон-

ном горизонтах довольно близки, что обусловлено постоянным перемешиванием всей водной толщи литорали.

7. Горизонтальное распределение бактерий в воде оз. Байкал в очень сильной степени зависит от направления, силы и продолжительности ветров.

Восточно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25/XII 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Яснитский, Б. А. Бланков, В. М. Гортиков, Отчет о работах Байкальской биологической станции. Изв. Биол.-геогр. и.-и. ин-та при Иркутском ун-те, т. III, вып. 3, 1927.
2. Н. Б. Нечаева, А. Г. Родина (Салимовская), Микробиологический анализ донных отложений Байкала. Тр. Байкальск. лимнолог. ст., т. VI, 1935.
3. С. И. Кузнецов, Биомасса бактерий и фитопланктона Среднего Байкала. Тр. Байкальск. лимнолог. ст., т. XIII, 1951.
4. А. Г. Родина, Бактерии в продуктивности каменной литорали озера Байкал. Тр. пробл. и тематич. совещ. ЗИН АН СССР, вып. II, 1954.
5. С. И. Кузнецов, Микробиологическая характеристика вод и грунтов Байкала. Тр. Байкал. лимнолог. ст., т. XV, 1957.
6. А. Г. Родина (Салимовская), Бактерии и дрожжевые грибки как пища для *Cladocera*. ДАН СССР, т. XXIX, № 3, 1940.
7. А. Г. Родина, Опыты по питанию *Daphnia magna*. Зоол. журн., т. XXV, вып. 3, 1946.
8. А. Г. Родина, Бактерии как пища для пресноводных моллюсков. Микробиология, т. XVII, вып. 3, 1948.
9. А. Г. Родина, Бактерии как пища водных животных. Природа, № 10, 1949.
10. А. Г. Родина, Роль бактерий в питании личинок тенетипид. ДАН СССР, т. 67, вып. 6, 1949.
11. А. Г. Родина, Экспериментальное исследование питания дафний. Тр. Всес. гидробиолог. об-ва, т. II, 1950.
12. А. С. Разумов, Прямой метод учета бактерий в воде. Сравнение его с методом Коха. Микробиология, т. 1, вып. 2, 1932.
13. Е. А. Рукина, В. И. Бирюзова, Метод получения мембранных ультрафильтров для прямого счета, свободных от микробных клеток. Микробиология, т. XXI, вып. 1, 1952.
14. А. Г. Родина (Салимовская), Микробиологические исследования Онежского озера в 1930 и 1931 гг. Исследования озер СССР, вып. 1, Изд. Гос. гидролог. ин-та, Л., 1932.
15. А. Г. Родина (Салимовская), О вертикальном распределении бактерий в воде озер. Микробиология, т. VII, вып. 6, 1938.
16. R. Beré, Numbers of bacteria in inland lakes of Wisconsin as shown, by the direct microscopic method. Int. Rev. d. Hydrobiol., vol. 29, 1933.
17. R. Bertel, Sur la distribution quantitative des bacteries planctoniques des cotons de Monaco. Bull. de l. Inst. oceanogr., Monaco, № 224, 1912.
18. F. Fischer, Die Bakterien des Meeres nach den Untersuchungen der Plankton-Expedition. Ergebnisse der Plankton-Expedition der Humboldt-Stiftung, Bd. 4, 1894.
19. V. E. Graham, R. T. Young, A bacteriological study of flathead lake Montana. Ecology, vol. 15, 1934.
20. L. Minder, Zur Hydrophysik des Zürich- und Walensees, nebst Beitrag zur Hydrochemie und Hydrobakteriologie des Zürichsees. Arch. für Hydrobiol., Bd. 12, Hf. 1, 1920.
21. A. Zih, Beiträge zur Bacteriologie der Lunzer Seen. Int. Rev. der gesamten Hydrobiol. und Hydrographie, Bd. 26, Hf. 5—6, 1932.
22. E. Fred, F. Wilson, A. Davenport, The distribution and significance of bacteria in lake Mendota. Ecology, vol. 5, 1924.
23. B. Lloyd, Bacteria of the Clyde sea area. A quantitative investigation. Journ. Mar. Biol. Assoc., vol. 16, 1930.
24. H. W. Reuszer, The distribution of bacteria in the ocean waters and muds about Cape Cod. Biol. Bull., vol. 65, 1933.
25. C. E. Zobell, C. B. Feltham, Preliminary studies on the distribution and characteristics of marine bacteria. Bull. Scripps Inst. Oceanograph., tech. ser., vol. 3, № 12, 1934.

26. С. Е. Зобелл, G. F. McEwen, The lethal action of sunlight upon bacteria in sea water. Biol. Bull., vol. 68, № 1, 1935.
27. М. М. Кожов, Вертикальное распределение планктона и планктоноядных рыб озера Байкал. Вопр. ихтиологии, вып. 2, Изд. АН СССР, 1954.
28. Б. С. Алеев, К. А. Мудрецова, Роль фитопланктона в динамике азота в воде «цветущего» водоема. Микробиология, т. VI, вып. 3, 1937.
29. С. В. Горюнова, Химический состав и прижизненные выделения синне-зеленой водоросли *Oscillatoria splendida* Gr. Изд. АН СССР, М., 1950.
30. С. В. Горюнова, Прижизненные выделения диатомовой водоросли *Synedra* sp. Тр. Ин-та микробиологии АН СССР, вып. 3, М., 1954.
31. К. А. Гусева, Взаимоотношения фитопланктона и сапрофитных бактерий в водоеме. Тр. пробл. и тематич. совещ. ЗИН АН СССР, вып. 1, 1951.
32. А. Е. Крисс, Микробная жизнь в океанических глубинах. Успехи совр. биол., т. XXIV, вып. 2, 1952.
33. С. В. Таулог, The bacteriology of lakes. Endeavour, vol. 7, № 27, 1948.
34. К. К. Вотинцев, Материалы по динамике биогенных элементов в водах оз. Байкал. ДАН СССР, т. LXXXIV (84), № 2, 1952.
35. Г. Ю. Верещагин, Байкал. Иркутск, 1947.
36. М. М. Кожов, Животный мир озера Байкал. Иркутск, 1947.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Б. В. СУДНИШНИКОВ, Н. Н. ЕСИН

НОВЫЙ ПРИНЦИП ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ УДАРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОЛОТКОВ

Повышение мощности, а следовательно, и производительности пневматических молотков во многих случаях может осуществляться только путем увеличения частоты ударов, так как увеличение энергии единичного удара машины допустимо лишь до некоторого предела, определяемого прочностью рабочего инструмента. Практика показывает, однако, что сколько-нибудь значительное повышение числа ударов пневматического молотка при данном сетевом давлении сжатого воздуха, данном диаметре цилиндра и при сохранении достаточно большой массы ударника — задача сложная и решение ее требует дальнейшего совершенствования ударных механизмов и рабочих циклов. В качестве типичного примера можно назвать задачу увеличения числа ударов погружного бурильного молотка, т. е. молотка, работающего внутри буримой скважины (в этих машинах возможность увеличения диаметра цилиндра ограничивается сечением скважины).

Новый принцип повышения частоты ударов пневматического молотка заключается в применении специального рабочего цикла, отличающегося от обычных коренным изменением характера движения ударника в конце обратного и в начале прямого ходов. Кривая ОАВА₁Д₁ на рис. 1 изображает типичный график перемещения ударника обычного пневматического молотка за время одного рабочего цикла (период T₁). В конце обратного и в начале прямого ходов ударник движется с малыми скоростями и на преодоление небольшого участка пути затрачивает большое время, составляющее значительную часть общей продолжительности цикла. Если отказаться от плавного затормаживания ударника в конце обратного хода и в момент, когда он еще имеет большую скорость (точка А), ударом изменить направление его движения на противоположное, то можно осуществить движение по закону, изображаемому ломаной кривой ОАД. Такое изменение движения ударника позволяет резко сократить длительность рабочего цикла за счет времени ΔT, которое было необходимо для перемещения ударника на участке АВА₁. Сокращение времени цикла до величины T обеспечивает значительное повышение частоты ударов молотка.

На рис. 2 показан один из возможных конструктивных вариантов высокочастотного пневматического ударного механизма, в котором используется описанный способ повышения частоты.* Отличительная особенность этого механизма — наличие в цилиндре 4 двух ударников, которые могут быть совершенно одинаковыми. Основной ударник 3 имеет обычное назначение и во время работы молотка периодически наносит удары по хвостовику инструмента 5. С помощью вспомогательного ударника 2 осуществляется ударное изменение скорости основного ударника при переходе от обратного хода к прямому.

Машина работает следующим образом. В конце обратного хода ударники движутся навстречу друг другу, и где-то посредине длины цилиндра происходит их соударение (положение, изображенное на рис. 2), после чего начинается прямой ход. При прямом ходе ударники движутся от середины цилиндра к его концам за счет начальных скоростей, приобретенных ими в результате этого удара, и под действием

* Принципиальная новизна такого ударного механизма подтверждена решением о выдате Б. В. Суднишникову, Н. Н. Есину и П. М. Емельянову авторского свидетельства (приоритет 10 августа 1957 г.).

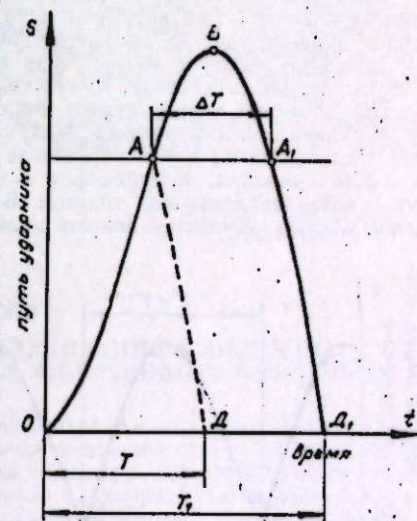


Рис. 1.

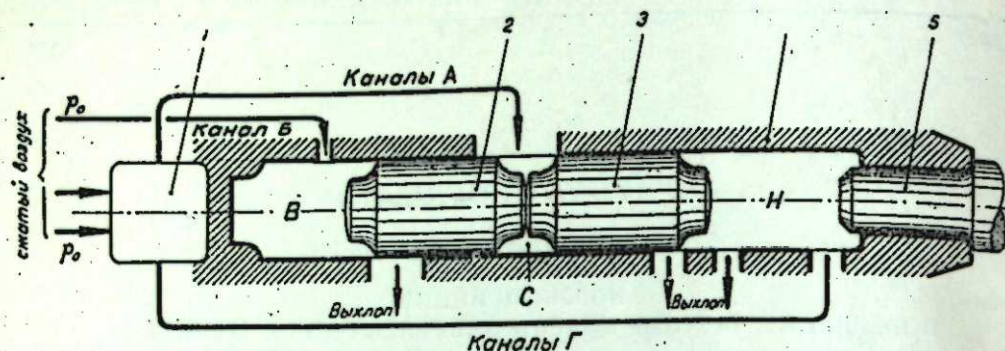


Рис. 2.

давления сжатого воздуха, поступающего в среднюю полость С цилиндра по каналам А от воздухоподводящего устройства 1. Движение вспомогательного ударника 2 тормозится сначала давлением сжатого воздуха, непрерывно поступающего из сети в верхнюю полость В цилиндра, а затем — давлением воздушного буфера, отсекаемого ударником в верхней полости. Скорость движения основного ударника 3, наоборот, возрастает. Незадолго до окончания прямого хода происходит выхлоп воздуха из средней полости цилиндра, и давление в ней резко падает. Вследствие этого воздухоподводящее устройство прекращает подачу сжатого воздуха по каналам А и включает каналы Г для впуска воздуха в нижнюю полость Н цилиндра. Основной ударник наносит удар по хвостовику инструмента, в результате чего машина совершает полезную работу в соответствии со своим производственным назначением. После этого ударник отскакивает от хвостовика инструмента и начинается обратный ход.

При обратном ходе ударники движутся во встречных направлениях: основной — под действием сжатого воздуха, поступающего в нижнюю полость, а вспомогательный — под действием давления сначала воздушного буфера в верхней полости, а затем сжатого воздуха, поступающего в эту полость по каналу Б, постоянно соединенному с воздухоподводящим трактом. В конечный период обратного хода начинается выхлоп воздуха из нижней полости цилиндра. В результате резкого падения давления

в этой полости и повышения давления в средней вследствие сжатия, воздухоподводящее устройство изменяет подачу сжатого воздуха в цилиндр. Вскоре происходит соударение двух ударников, и описанный цикл повторяется снова.*

В сочетании с таким ударным механизмом могут быть использованы воздухоподводящие устройства различных типов из числа обычно применяемых в пневматических молотках. В приведенном описании подразумевалось распределение клапанного типа, в котором перекидка клапана происходит в результате падения давления при выхлопе воздуха из цилиндра. Могут быть использованы и другие системы распределения, например, такие, в которых управление распределительным органом осуществляется с помощью командных каналов и т. д.

На рис. 3 совмещены графики движения основного и

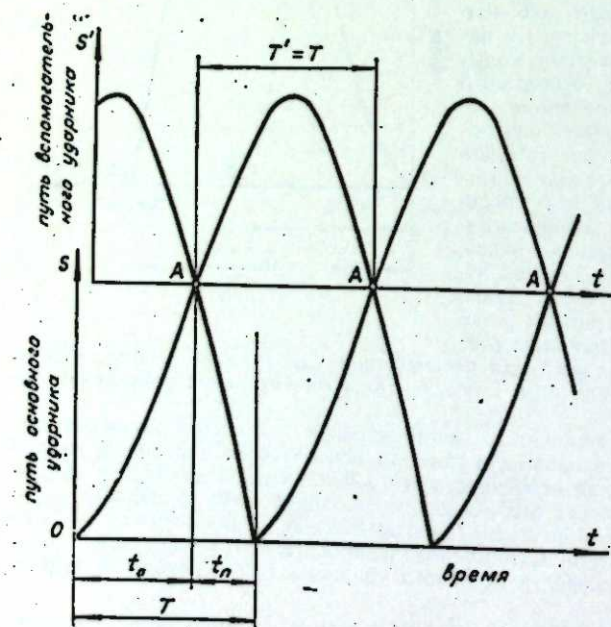


Рис. 3.

вспомогательного ударников в координатах «путь-время». В точках А происходит соударение ударников, в результате чего они обмениваются скоростями. Нужно заметить, что потери энергии при этих ударах очень малы.

* Теоретически возможны аналогичные механизмы с числом ударников больше двух.

Для устойчивой работы высокочастотного ударного механизма подобного типа необходима система автоматического регулирования, гарантирующая равенство продолжительности циклов движения основного и вспомогательного ударников.

Автоматическое регулирование может осуществляться различными способами. В качестве примера можно привести простейший метод регулирования времени цикла вспомогательного ударника за счет изменения среднего давления в верхней полости цилиндра. Положим, что вследствие изменения свойств или характера деформации внешней среды, на которую воздействует инструмент молотка, значительно уменьшилась скорость отскока основного ударника после удара по хвостовику инструмента. Вследствие и встреча его со вспомогательным ударником будет двигаться медленнее, чем обычно, (на рис. 2 — правее изображенным произойдет на меньшем расстоянии от инструмента ударник пройдет вперед дальше обычного и шире откроет выхлопное окно. Давление в верхней полости сильно упадет, и при движении вспомогательного ударника в обратном направлении его торможение, а затем разгон будут осуществляться меньшими силами, что приведет к увеличению времени движения (пропускная способность канала, подпитывающего верхнюю полость сжатым воздухом, должна быть невелика, чтобы наполнение полости после выхлопа происходило сравнительно медленно). В результате следующая встреча ударников произойдет уже ближе к обычному месту, а через несколько циклов установится устойчивый режим работы, причем место соударения ударников будет несколько смещено по направлению к инструменту. Настройку системы регулирования, обеспечивающую надежную работу механизма, можно подбирать путем изменения сечения выхлопных окон верхней полости, открывающихся по мере ухода вперед вспомогательного ударника, а также изменением сечения подпитывающего канала.

Могут быть применены и другие системы автоматического регулирования.

При одинаковых основных параметрах (рабочее давление сжатого воздуха, площадь поперечного сечения цилиндра, масса ударника и энергия единичного удара машины) ударный механизм нового типа, как показали расчеты, позволяет получить примерно в 1,5 раза большую частоту ударов, чем пневматические молотки обычной конструктивной схемы.

Увеличение частоты ударов имеет особенно важное значение для повышения производительности бурения глубоких скважин в горных породах и рудах с помощью погружных бурильных молотков.

Западно-Сибирский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30/XII 1957.

В. В. ВЛАСОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Электромагнитная дефектоскопия получила развитие в последние два десятилетия. Ее методы применяются в различных отраслях промышленности для контроля за изделиями без их разрушения. На железнодорожном транспорте электромагнитная дефектоскопия стала одним из основных средств контроля за рельсами, лежащими в пути.

Однако применявшиеся до последнего времени рельсовые электромагнитные дефектоскопы обладали существенными недостатками.

Прежде всего, они могли работать лишь при ограниченных скоростях, не превышавших двух-трех десятков километров. Необходимо было максимально повысить скорость дефектоскопов, чтобы при их работе не нарушалось нормальное движение поездов.

Далее, электромагнитные дефектоскопы выявляют лишь дефекты головки рельсов, чувствительность их к дефектам подошвы и шейки практически ничтожна. При этом они реагируют не только на опасные дефекты, но и на неопасные изъяны поверхности головки рельсов (всевозможные налеты, трещинки в накатанном металле, следы от ударов костыльного молотка и т. д.). При контроле рельсов в условиях движения сигналы, соответствующие опасным дефектам, составляют менее 1% от общего количества сигналов, даваемых аппаратурой. Следовательно, в условиях контроля рельсов при высокой скорости движения возникает важная проблема выделения полезных сигналов.

Исследуя в течение ряда лет дефектоскопию рельсов в условиях движения, мы пришли к мысли, что устранить выше недостатки электромагнитных дефектоскопов можно, если использовать индуктивный метод выявления дефектов с применением постоянного высшего магнитного поля. Этот метод уже апробирован при сравнительно невысокой скорости движения [1, 2]. Применение его при высоких скоростях казалось нам весьма перспективным по следующим соображениям.

Выявление дефектов в ферромагнитных телах осуществляется, как известно, благодаря возмущениям поля над дефектным участком изделия. Эти возмущения обуслов-

лены намагниченностью изделия или перераспределением дефектом электрических токов, наводимых в нем тем или иным способом. В частности, в дефектоскопии используются вихревые токи, наводимые переменным магнитным полем. Они наводятся в изделиях и в тех случаях, когда источник магнитного поля и намагничиваемый им объект находятся в состоянии относительного движения. Идея применения таких токов для дефектоскопии рельсов была высказана, насколько нам известно, впервые А. П. Бутурлиским в 1928 г. [3]. Эта идея интересна в следующих отношениях.

Электропроводность среды, заключенной в пределах дефекта-трещины, практически ничтожна, тогда как магнитная проницаемость той же среды не является бесконечно малой величиной. Вследствие этого электрический ток при встрече с дефектом обтекает последний, а магнитный поток претерпевает лишь незначительное возмущение, проходя большей своей частью непосредственно через дефект. Следовательно, чувствительность дефектоскопа к дефектам при выявлении их посредством вихревых токов должна быть выше, чем при обнаружении их благодаря намагниченности изделия, при прочих равных условиях. Кроме того, рассматриваемые токи в однородном недефектном изделии, как известно, постоянны по направлению, причем наводятся они посредством индукции. Последнее позволяет иметь в условиях дефектоскопии принципиально любые скорости движения. При этом есть основание ожидать, что поверхностный эффект в рельсах при намагничивании их в условиях движения будет выражен слабее, чем при контроле рельсов посредством дефектоскопов с применением вихревых токов, наводимых переменным магнитным полем звуковой частоты [4; 5].

Правда, попытка применить вихревые токи, наводимые в рельсах движущимся источником магнитного поля, для дефектоскопии [6] не увенчалась успехом. Более того, возможность применения вихревых токов для этой цели ставится под сомнение [7].

Это, по-видимому, связано с недостаточной изученностью вихревых токов в рельсах. Именно этим, как нам кажется, объясняется то, что в разработанном дефектоскопе имелись существенные недостатки, из-за которых он не мог быть использован на практике. Недооценка самой идеи применения вихревых токов для дефектоскопии рельсов обусловлена, вероятно, неравномерным обобщением [7] результатов теоретических и экспериментальных исследований [8, 9], выполненных применительно к области слабых полей, и распространением их на область сравнительно сильных полей, используемых при дефектоскопии этих изделий. На решении этих проблем в течение нескольких лет и были сосредоточены наши усилия.

Проведенные нами исследования обобщены в ряде статей, которые скоро выйдут из печати. В связи с этим мы ограничимся здесь лишь кратким перечислением наиболее существенных результатов, полученных нами в области дефектоскопии рельсов в движущемся магнитном поле.

Вихревые токи, наводимые в изделиях движущимся источником магнитного поля, удовлетворяют, как это следует из математической формулировки задачи, сложному интегро-дифференциальному уравнению. Решение этого уравнения в общем виде невозможно из-за непреодолимых математических затруднений. Возможности изучения интересующих нас электромагнитных явлений в условиях непосредственного намагничивания рельсов движущимся источником поля довольно ограничены. Поэтому для изучения вопросов дефектоскопии рельсов в условиях движения мы воспользовались физическим моделированием с учетом требований теории подобия [10, 11]. Однако, приступая к исследованиям, мы столкнулись с тем, что подобие электромагнитных явлений в случае, когда источник магнитного поля и намагничиваемое им тело находятся в состоянии относительного движения, еще не было разработано. В связи с этим нами был предложен критерий подобия электромагнитных явлений для данного случая [12]. Несколько позднее этот вопрос был более детально исследован И. М. Кирко [13].

Нами была разработана экспериментальная установка для приближенного моделирования намагничивания недефектного и дефектного рельсов движущимся источником поля. При помощи этой установки удалось изучить многие вопросы дефектоскопии рельсов в движущемся магнитном поле. Кроме того, использованы в возможных пределах аналитический метод исследований, а также непосредственные эксперименты в путевых условиях, проводившиеся в содружестве с работниками Томской ж. д. Наиболее существенные результаты, полученные нами, сводятся к следующим положениям.

Установлено, что в рельсах при «продольном» намагничивании их движущимся источником поля наводятся сравнительно интенсивные вихревые токи. Из произведенной нами грубоприближенной оценки следует, что настил тока в рельсах типа I-A при витков (при рассмотрении между центрами полюсов 0,5 м) и движущимся со скоростью 45 км/час, составляет около 100 а/см.

Изучена продольная, относительно направления скорости движения, составляющая напряженности электрического поля на боковой поверхности головки рельса. Электростатическое поле на поверхности рельса с увеличением скорости движения, как и следовало ожидать, возрастает. Небезынтересно отметить следующее. Напряженность электрического поля на поверхности головки рельса посередине между полюсами электромагнита при скорости движения его 50 км/час составляет примерно 4,3 мв/см. На основании приближенной оценки найдено, что продольная составляющая плотности тока в голов-

ке рельса при внешней магнитодвижущей силе 23 тыс. ампер-витков и скорости движения электромагнита 50 км/час достигает примерно 80 а/см² на середине расстояния между полюсами электромагнита и до 200 а/см² вблизи полюсов.

Интенсивность вихревых токов, развиваемых движущимся источником магнитного поля в рельсах, принципиально достаточна для выявления дефектов в них. Заметим, что токи в пределах между полюсами электромагнита, как показали наши исследования, имеют одно и то же направление, благоприятное для выявления опасных — продольных, наклонных и поперечных — трещин в головке рельсов. Из соображений общего характера, кроме того, следует, что работа дефектоскопа, в котором выявление дефектов осуществляется при помощи вихревых токов, должна быть более эффективной при контроле рельсов тяжелого типа, нежели выходящих из употребления старых рельсов легкого типа.

Изучена продольная составляющая магнитного потока в головке рельса типа I-A при намагничивании его движущимся электромагнитом. Установлено, что характер изменения потока во времени в том или ином участке головки рельса зависит от формы и величины полюсных наконечников электромагнита. Наши данные относятся к случаю намагничивания рельсов электромагнитом с полюсными наконечниками, имеющими плоскую поверхность со стороны рельса.

Показано, что магнитный поток в головке рельсов посередине между центрами полюсов электромагнита при скорости движения 45 км/час имеет максимум при некоторой величине воздушного зазора между полюсами и рельсом, если внешнее поле невелико. Это объясняется эффектом размагничивания и согласуется с хорошо известными данными о намагниченности ферромагнитных тел в магнитных цепях с воздушным зазором. Заметим, что в таких случаях временная намагниченность имеет максимум при некоторой величине зазора, если поле не ниже критического. Установлено, что магнитный поток в головке рельсов посередине между полюсами электромагнита с возрастанием скорости движения убывает, и притом в тем большей степени, чем выше внешнее поле. По произведенной нами оценке, головка рельса при скорости движения 50 км/час промагничивается на середине расстояния между полюсами электромагнита на глубину от 0,5 до 1,5 см, в зависимости от внешнего поля.

Зависимость промагничивания рельсов от внешнего поля, на первый взгляд, кажется парадоксальной. Однако она, как показал анализ, уже содержится в дифференциальном уравнении для плотности токов, наводимых в изделиях движущимся источником магнитного поля.

Наши исследования показывают, что при контроле ферромагнитных изделий в движущихся магнитных полях не следует стремиться к применению сравнительно сильных внешних полей. Из произведенной нами приближенной оценки следует, что расстояние между центрами полюсов электромагнита должно быть примерно от 0,5 до 1,5 м. С уменьшением его промагничиваемость головки рельса заметно убывает.

Установлен механизм выявления дефектов в рельсах при намагничивании их движущимся источником поля. Показано, что вихревые токи в рельсах участвуют в формировании поля дефекта. С возрастанием скорости движения роль токов в формировании поля дефекта возрастает, а роль намагниченности изделия заметно убывает.

Обнаружена критическая скорость движения источника поля, ниже которой выявление дефектов происходит благодаря намагниченности изделия, а выше ее — при помощи вихревых токов. Критическая скорость зависит от характера дефекта, а также от внешнего поля. Для сравнительно глубокого дефекта, при магнитодвижущей силе 20 тыс. ампер-витков и более она составляет примерно 22 км/час.

Все изложенные выше результаты были получены нами путем исследования физической модели рельса и намагничивающего устройства дефектоскопа. Кроме этого, были проведены обширные исследования на действующем дефектоскопном вагоне. Они позволили изучить выявляемость различных дефектов рельсов и соответствующие им формы импульсов электродвижущей силы, наводимых в искательной катушке в случае, когда она расположена над рельсом посередине между полюсами электромагнита и ориентирована плоскостью своих витков перпендикулярно поверхности головки рельса.* Установлена возможность выявления дефектов в рельсах при скорости движения до 90 км/час.

Исследования показали, что опасные дефекты рельсов проявляются в ограниченном количестве форм импульсов электродвижущей силы, которые отличаются от импульсов, соответствующих металлическим деталям строения пути и неопасным изъянам поверхности рельсов. Благодаря этому удалось сравнительно просто решить проблему выделения полезных сигналов, что имеет большое практическое значение, так как дает возможность уже при чтении записи исключить из рассмотрения импульсы, не относящиеся к дефектам, и тем самым сократить до минимума количество рельсов, которые необходимо подвергнуть натурному осмотру или дополнительному контролю.

Таким образом, в области дефектоскопии рельсов, по существу, решены проблемы повышения скорости движения контрольной аппаратуры и применения для целей дефектоскопии вихревых токов, наводимых в рельсах движущимся источником магнит-

* В выполнении этой работы принимал участие инж. А. И. Воробьев (Томская ж. д.).

ного поля, а также проблема выделения полезных сигналов. Это позволило внести в работу электромагнитных вагонов-дефектоскопов коренные изменения.

Первый опытный вагон-дефектоскоп новой конструкции был разработан нами в сотрудничестве с работниками Томской ж. д. и введен на этой дороге в начале 1952 г.* Этот дефектоскоп в настоящее время применяется для контроля рельсов при скорости движения до 90 км/час. По скорости движения при контроле рельсов он превосходит все известные рельсовые дефектоскопы.

Министерством путей сообщения было построено десять типовых вагонов-дефектоскопов аналогичной конструкции**. Однако по причинам технического характера эти дефектоскопы контролируют рельсы лишь при скорости движения до 55 км/час [14].

Вагоны-дефектоскопы выявляют сравнительно сильно развитые поперечные, продольные и различные сложные трещины в головке рельсов, залегающие относительно неглубоко или открывающиеся выходом на поверхность. Вместе с другими средствами дефектоскопии они применяются для контроля рельсов [14—16] на многих железных дорогах страны: Томской, Свердловской, Омской, Восточно-Сибирской, Сталинской, Приволжской, Московско-Курско-Донбасской и др.

В связи с применением электромагнитных дефектоскопов для контроля рельсов при высокой скорости движения возникла проблема экономичного и удобного способа регистрации импульсов электродвижущей силы, развиваемых в искательной катушке. В вагонах-дефектоскопах для этой цели применяется метод фотозаписи. Однако применение его связано с расходом большого количества сравнительно дефицитной киноплёнки (5 м на 1 км пути), и проведение фотопроцедур с затратой фотоматериалов. Как показали наши исследования, можно воспользоваться магнитной плёнкой, применяемой в магнитофонах для записи звука [17], и относительно несложным приспособлением для визуализации зарегистрированных на ней импульсов.***

Кроме того, нами проведено изучение некоторых узлов дефектоскопа. Установлено, что практически наиболее эффективным является применение дифференциальной искательной системы.

Был изучен также вопрос о наиболее целесообразном устройстве для наведения токов в рельсах при помощи поперечного магнитного поля. Продольная составляющая плотности тока, наводимого в рельсах разработанным нами индуктором с поперечным полем, достигает по приближенной оценке примерно 10 а/см^2 .

В связи с вопросами дефектоскопии рельсов мы исследовали влияние магнитной нелинейности материала изделия на поле дефекта в условиях магнитостатистики. Представление о роли магнитной нелинейности материала изделия в формировании поля дефекта впервые высказано Р. И. Янусом [18], а затем более детально исследовано А. Б. Сапожниковым [19]. Полученные нами экспериментальные данные [20—22] находятся в качественном соотношении с теоретическими представлениями, согласно которым объемные магнитные заряды усиливают поле действующей проницаемости материала изделия, и ослабляют его при меньших полях. Показано, что увеличение поля дефекта в области сильных полей наблюдается лишь в пределах определенной глубины залегания дефекта. Кроме того, установлено, что более жесткий в магнитном отношении материал вблизи поверхности изделия способствует увеличению поля дефекта, тогда как более мягкий ослабляет его. Это позволило объяснить выявление в старых рельсах легкого типа более глубоких дефектов, чем в новых рельсах тяжелого типа, при контроле их магнитно-зондовым дефектоскопом [23].

Дальнейшее усовершенствование методов скоростной дефектоскопии рельсов должно состоять в выявлении более глубоких внутренних дефектов (трещин) и в увеличении рабочей скорости дефектоскопа до 100—120 км/час. Для этой цели необходимо экспериментально исследовать распределение плотности вихревых токов не только на поверхности рельса, как это было сделано нами, но и по всему его сечению.

Уральский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10/IX 1957

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Suzuki, An Improved Magnetic Rail Defectoscope. Anniversary Volume dedicated to professor Kōtaro Honda, Sanday, 1936.
2. Технический справочник железнодорожника, т. 5, Трансжелдориздат, 1951.
3. А. П. Бутурлинский и Я. Авторское свидетельство № 54820, 1928.
4. Руководство по работе с дефектоскопной тележкой Сибирского физико-технического института. Модель № 13 (ДС-13), Трансжелдориздат, 1947.
5. М. В. Трахтенберг, Съёмный рельсовый дефектоскоп на переменном поле типа РДП-56. ЦНИИ. Трансжелдориздат, 1953.

* В разработке опытного и типового вагонов-дефектоскопов принимали участие инженеры А. И. Воробьев (Томская ж. д.) и Е. И. Успенский (Министерство путей сообщения).
** Технический проект типового вагона-дефектоскопа выполнен в Проектно-конструкторском бюро МПС коллективом конструкторов, возглавляемых инж. А. И. Гагариним.
*** В выполнении этой работы принимали участие инж. В. И. Бабушкин (Омская ж. д.) и работник института физики металлов УФАИ СССР Ю. С. Субботин.

6. А. Н. Матвеев, М. В. Трахтенберг, Усовершенствование методов дефектоскопии, ЦНИИ МПС, отчет, 1944.
7. А. Б. Сапожников, Основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. Дисс., Томск, 1952.
8. Т. М. Сычева, Исследование магнитного поля вихревых токов в плоских образцах. ЖТФ, т. 25, вып. 6, 1955.
9. Т. М. Сычева, Опытные исследования магнитного поля вихревых токов в объемных образцах. Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та, вып. 35, Томск, 1956.
10. В. А. Венников, Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Гостехиздат, 1949.
11. И. М. Кирко, Физическое подобие и аналогия намагничивания ферромагнитных тел. Изд. АН Латв. ССР, Рига, 1955.
12. В. В. Власов, О применении моделирования к униполярно-индукционной задаче электромагнитной дефектоскопии. ДАН СССР, т. 69, № 1, 1949.
13. И. М. Кирко, Физическое подобие и аналогия намагничивания ферромагнитных тел. Изд. АН Латв. ССР, Рига, 1956.
14. Вагон-дефектоскоп. Железнодорожный транспорт, № 8, 1956.
15. А. Н. Матвеев, М. Мокеев, В. Козлов, Рельсовая дефектоскопия — важное средство обеспечения безопасности движения поездов, Железнодорожный транспорт, № 4, 1954.
16. А. Н. Наумов, Перспективы усиления пути и механизации путевых работ. Железнодорожный транспорт, № 2, 1956.
17. В. А. Бургов, Основы записи и воспроизведения звука. М., 1954.
18. Р. И. Янус, Некоторые вопросы теории магнитной дефектоскопии. ЖТФ, т. 15, вып. 3, 1945.
19. А. Б. Сапожников, Некоторые простейшие нелинейные расчеты в магнитной дефектоскопии. Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та, вып. 30, Томск, 1950.
20. В. В. Власов, Э. Э. Стойникова, О влиянии магнитной нелинейности материала изделия на поле дефектов типа трещин. ФММ, т. 4, вып. 3, 1957.
21. В. В. Власов, Л. З. Пятигорская, Сравнительное исследование поля открытого и внутреннего дефектов. ФММ, т. 5, вып. 2, 1957.
22. В. В. Власов, Л. З. Пятигорская, Исследование влияния материала изделия на поле дефекта. ФММ, т. 5, вып. 2, 1957.
23. Рельсовый дефектоскоп МРД-52 системы ЦНИИ МПС. Трансжелдориздат, 1953.

В. И. КУЗНЕЦОВ, И. С. ЛЕВИН

К ВОПРОСУ О КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИНДИЯ

В литературе по количественному определению индия мало внимания уделено колориметрическим методам. Колориметрически индий определяют либо по Гейльману [1], либо по Мюллеру [2]. По методу Гейльмана осаждают сероводородом сульфид индия, который в присутствии защитного коллоида (желатина) образует золотисто-желтый устойчивый, легко колориметрируемый раствор. Определению индия мешают все осаждающиеся сероводородом элементы. Ошибки определения достигают 20%. Метод имеет ограниченное применение. По методу Мюллера, применяемому значительно чаще, индий экстрагируют из водного раствора при $\text{pH} = 3,5$ раствором 8-оксихинолина в хлороформе, и полученный желтый раствор фотометрируют при 400 м μ . Фотометрическое определение индия в виде дитизаната [3] и диэтилдитиокарбамината [4] широкого распространения не получило.

В ряде случаев необходимо быстро определять малые количества индия. Для этого мы предлагаем реагент «арсеназо». Чувствительная цветная реакция индия с арсеназо известна уже давно [5, 6]. Комплексное соединение индия с арсеназо в растворе имеет фиолетовую окраску, интенсивность которой сильно зависит от pH раствора, что видно на рис. 1.

Для колориметрического определения индия добавляют 2,5—4-кратное количество реагента по сравнению с теоретически необходимым. При концентрации индия от 0,8 до 50 μ в 1 мл пользуются 0,003 м—0,005 раствором арсеназо, избыток которого не мешает определению. Доводят pH раствора до 4,5—5,2 (оптим 4,8) на pH -метре, прибавляя несколько капель 25-процентного уротропина, и колориметрируют на ФЭКН-54 при светофильтре 7 (оранжево-желтый) или на спектрофотометре при $\lambda = 580 \text{ м}\mu$. Необходимость измерения в этой области видна из рис. 2 (одна кривая для чистого арсеназо, другая — для комплекса индия и арсеназо).

Окраска развивается быстро и устойчива во времени. Определению при этих усло-

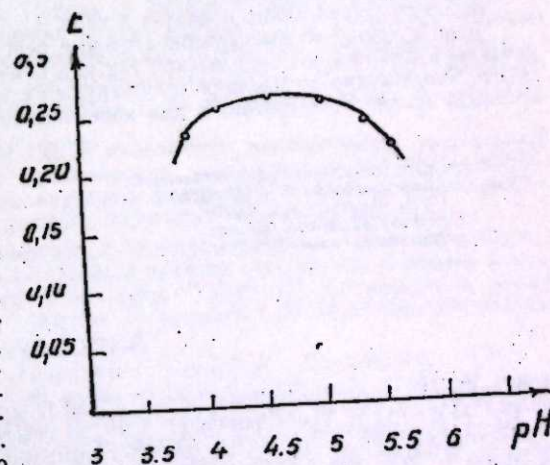


Рис. 1.

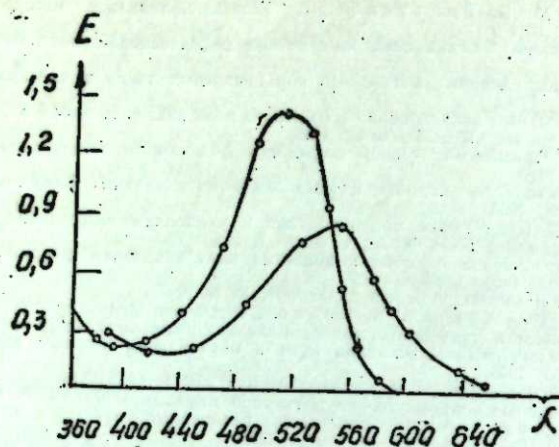


Рис. 2.

Определение индия в его чистых растворах

Таблица I

Введено, г/мл	Найдено, г/мл	Абс. ошибка	Относ. ошибка	Введено, г/мл	Найдено, г/мл	Абс. ошибка	Относ. ошибка
1,53	1,36	-0,17	-11				
3,06	3,25	+0,19	+6,2	18,34	17,96	-0,38	-2,1
4,59	4,41	-0,18	-3,9	27,51	26,88	-0,63	-2,3
6,12	5,93	-0,19	-3,1	3,68	37,45	+0,77	+2,1
7,65	7,48	-0,17	-2,2	45,85	44,75	-1,1	-2,5
9,18	9,4	+0,22	+2,5	55,02	56,83	+1,81	+3,3

виях не мешают большие количества щелочных, щелочно-земельных ионов, NH_4^+ , CO , Ni и, что весьма важно, Zn , Cd , Pb .

Точность определения показана в табл. I.

Если учесть, что высококонцентрированные реагенты для индия, видимо, пока еще не найдены и что при его определении так или иначе приходится тщательно освобождаться от большинства мешающих сопутствующих элементов, то использование реагента арсеназо можно рекомендовать для конечного определения индия.

Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского Академии наук СССР Западно-Сибирский филиал Академии наук СССР

Поступила в редакцию 27/II 1958

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbuch der analytischen Chemie, 3 Teil Quantitative Analyse, Bd. 3, 1956.
2. Th. Moeller, The Chemistry of In. A colorimetric Method for the Estimation of Small Amounts of In. Industrial and Engineering Chemistry, vol. 15, № 4, 1943.
3. May J., Hofmann J., Washington. Acad. of Sci., 38, № 10, 329-336, 1948.
4. Asak V., Sedivec V., Chem listy 46, 607, 1952.
5. В. И. Кузнецов, Приемы отыскания цветных реакций для неорганических ионов. Дисс., т. II, стр. 398, т. III, стр. 563, ГЕОХИ АН СССР, М., 1948.
6. В. И. Кузнецов, Цветная реакция на редкоземельные элементы. Журн. анал. хим., т. VII, 1952.

ХРОНИКА

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЖЕНЬШЕНЕВОГО КОМИТЕТА

В феврале 1958 г. состоялось очередное (четырнадцатое) заседание Женьшеневого комитета при Президиуме Дальневосточного филиала АН СССР. На заседании присутствовали сотрудники ряда научных учреждений Владивостока, представители краевых организаций и других ведомств, а также сотрудники филиала.

Перед заседанием Президиум филиала утвердил новый состав Женьшеневого комитета. В него вошли ученые Дальневосточного филиала, ВИЛАРа (Москва), Института ботаники (Ленинград), Хабаровского медицинского института, Благовещенского медицинского института, Сихотэ-Алинского госзаповедника, Владивостокского института эпидемиологии, микробиологии и гигиены и других учреждений — всего 31 человек. Возглавляет Женьшеневый комитет Председатель Президиума Дальневосточного филиала АН СССР проф. В. Т. Быков.

Свое очередное заседание в феврале комитет посвятил итогам изучения женьшеня за 1957 г., работе комитета по координации научных исследований в СССР и установлению международных связей.

Во вступительном слове проф. В. Т. Быков сказал, что после пребывания ряда сотрудников филиала в КНДР и КНР учеными филиала и учеными этих стран начаты совместные исследования женьшеня. Далее он отметил, что деятельность комитета не ограничивается теперь изучением только женьшеня. Уже сейчас ведутся и планируются на будущее исследования других растений из семейства аралиевых, а также лекарственных средств животного происхождения, например, рогов сайги, пантов и др. В Советском Союзе начаты работы по созданию промышленных плантаций женьшеня. Все это предъявляет к членам комитета новые требования и ставит перед ними ответственные задачи.

Доклад канд. биол. наук И. Ф. Беликова (ДВФАН СССР) был посвящен обзором разносторонней работы комитета по изучению женьшеня в СССР и установлению международных связей между учеными.

В настоящее время в Советском Союзе ведется комплексное изучение женьшеня: его биологии, агротехники, фармакологии и биологической стандартизации, лечебного действия и химического состава. Наряду с академическими учреждениями, в работу включаются все больше учреждений других ведомств. По изучению биологии и введению женьшеня в культуру исследовательские и опытные работы проводятся в Дальневосточном филиале АН СССР, Ботаническом институте АН СССР, ВИЛАРе, Сихотэ-Алинском и Тебердинском заповедниках и их опорных пунктах, в Ботаническом саду МГУ и др.

В Дальневосточном филиале АН СССР проводятся исследования фотосинтеза женьшеня, оптимальных условий его освещенности, минерального питания и анатомии. Накоплен обширный материал по изучению болезней женьшеня и мер борьбы с ними. Филиал имеет самую большую в стране плантацию женьшеня (2,5 га).

Для изучения возможности выращивания культуры женьшеня вне пределов его естественного ареала ДВФАН СССР в течение последних лет разослал семена и корни рассады женьшеня во все уголки Советского Союза: 28 ботаническим садам, 18 научным и опытным учреждениям, 7 школам, 2 колхозам и 28 любителям садоводства-мичурицам.

Рассада женьшеня послана в Польскую Народную Республику. Всего в 84 пункта отправлено 3787 корней и 4 кг семян женьшеня. Сейчас он растет не только на Дальнем Востоке, но и под Москвой, в Сибири, на Урале, в Поволжье, Средней Азии, Закавказье, на Украине, в Белоруссии, Прибалтийских республиках и других местах Советского Союза. Из 20 пунктов уже получены ответы на запросы о том, как растет женьшень в необычных для него условиях. Во многих местах корень чувствует себя прекрасно.

Изучение фармакологических и лечебных свойств женьшеня проводилось в 19 учреждениях Москвы, Ленинграда, Владивостока, Хабаровска, Благовещенска, Ворожея и других городов, 14 из них уже опубликовали результаты своих исследований.

ДВФАН СССР и Женьшеневый комитет проделали большую работу по публикации результатов научных исследований женьшеня.

В Женьшеневый комитет со всех концов Советского Союза поступают сотни писем с просьбой выслать женьшень и проконсультировать по методике его применения. Только за 1957 г. поступило 275 писем. Все обратившиеся в комитет получили письменные консультации.

Но спрос на женьшень в стране удовлетворяется далеко не полностью. Поэтому перед Женьшеневым комитетом стоит задача — добиться создания больших промышленных плантаций женьшеня на Дальнем Востоке.

В установлении международных связей по изучению женьшеня большую роль сыграли поездки в КНР и КНДР председателя Женьшеневого комитета проф. В. Т. Быкова и поездка в КНДР во второй половине 1957 г. группы научных сотрудников в составе кандидатов биол. наук И. Ф. Беликова и Д. П. Воробьева (ДВФАН СССР) и И. В. Грушвицкого (БИН АН СССР). Работы членов Женьшеневого комитета В. Т. Быкова, И. Ф. Беликова, И. В. Грушвицкого, И. Н. Найденовой, З. И. Гутниковой, П. П. Воробьевой и И. А. Бункиной опубликованы в Вестнике Академии наук КНДР и журнале Корейской фармации. В 1958 г. предполагается приезд двух научных сотрудников Академии наук КНДР во Владивосток для проведения совместных исследований. Ведутся переговоры о проведении в Кэсоне международного совещания по женьшеню.

Канд. биол. наук А. М. Печеницина (ДВФАН СССР) в докладе «Основные результаты и задачи научно-исследовательских работ по культуре женьшеня» подвела итоги работы коллектива исследователей (З. И. Гутниковой, П. П. Воробьевой и др.).

По минеральному питанию и световому режиму женьшеня получены новые данные, позволяющие давать более обоснованные рекомендации при введении его в культуру. Собран первый урожай товарных (шестилетних корней), полученных от посева семян. Собрано 20 кг семян женьшеня. В задачу дальнейших исследований входит более глубокое изучение вопросов фотосинтеза, минерального питания, светового режима и анатомического строения корней.

В недалеком будущем необходимо приступить к селекции женьшеня.

С большим интересом был заслушан доклад канд. с.-х. наук И. С. Андреевой (ДВФАН СССР) «Анатомическая характеристика разновозрастных корней». И. С. Андреева отметила, что корень женьшеня отличается мощным развитием тонкостенной паренхимы, отсутствием механических тканей и слабым одревеснением клеточных стенок. Сравнительное анатомическое изучение различных частей корня позволило объяснить неодинаковую втягивающую способность этих частей, которая обратно пропорциональна количеству сосудов. Нижняя часть корня содержит большее количество сосудов, чем верхняя. У корней женьшеня, выращенных под пологом леса и обладающих большой втягивающей способностью, сосудов оказалось меньше, чем у корней, выращенных на открытых плантациях с искусственным притенением и обладающих сравнительно меньшей втягивающей способностью.

В докладе были приведены данные о сравнительном анатомическом строении корней от 1- до 7-летнего возраста.

Некоторым результатам изучения химического состава корня женьшеня и его препаратов было посвящено сообщение канд. хим. наук И. Н. Найденовой (ДВФАН СССР).

О сравнительной биологической оценке различных корней женьшеня сделала сообщение М. А. Гриневич. Исследовались корни, выращенные на плантации Супутинского заповедника ДВФАН СССР. Корни, выращенные при искусственном притенении на открытых плантациях, оказались по своему фармакологическому действию сильнее, чем корни, выращенные на плантации под пологом леса. Индивидуальная вариабельность последних оказалась также большей. Сравнение разновозрастных корней показало, что активность их от 1-го к 5-му году возрастает.

Установлено, что в период отрастания подземного побега корень резко обедняется действующими веществами. Активность корней, выкопанных в это время (летом), в два раза меньше активности осенних или перезимовавших весенних корней.

В докладе были приведены также предварительные данные о сравнительной активности дикорастущих и культивируемых супутинских, китайских, корейских, тебердинских и выращенных в оранжереях Ботанического института корней.

Канд. мед. наук Б. К. Гаврилюк (Владивостокский ИЭМГ) сообщил новые данные о контактном действии корня женьшеня и летучих его фракций на некоторые виды патогенных микробов. Пробковый слой корня (кожица) на некоторые виды почек и летучие фракции из этих частей действуют угнетающе на рост грамположительных (стафилококк, стрептококк, сарцины, дифтерийную палочку) и грамотрицательных (кишечную палочку, бактерии брюшного тифа, паратифа А и В, дизентерии и др.) микроорганизмов. Древесный слой корня (ксилема) действует стимулирующе на все указанные выше микробы, а сердцевина не оказывает на них никакого влияния. Угнетающее действие кожицы на микробы не зависит от возраста корня, угнетающее действие луба с возрастом корня уменьшается, а стимулирующее действие

древесного слоя, наоборот, увеличивается. Действие корня женьшеня на микробы не зависит от его принадлежности к тому или иному товароведческому классу.

В докладе врача П. Д. Розен были приведены результаты лечения 76 больных гипертонической болезнью. Больные в течение 2—3 месяцев получали ежедневно 2 раза в день по 10 капель жидкого экстракта культивируемого женьшеня. Они лечились амбулаторно и в большинстве случаев никакого другого лечения не получали. У всех больных (за исключением 4) наблюдалось заметное снижение как максимального, так и минимального артериального давления, при этом значительно улучшалось общее самочувствие, исчезали боли в области сердца, одышка, головные боли и бессонница.

Одним из основных вопросов повестки дня Женьшеневого комитета явилось обсуждение докладной записки «Об организации в Приморском крае женьшеневого совхоза» (докладчик З. И. Гутникова, сотрудник ДВФАН СССР). За последние годы изучена биология женьшеня, разработаны основные агротехнические приемы его культуры, позволяющие сделать конкретные рекомендации по его выращиванию на открытых площадях с применением искусственного притенения. Выявлены возбудители заболеваний женьшеня и разработаны меры борьбы с ними. Освоен опыт культуры женьшеня в Корейской Народно-Демократической Республике — стране с древней историей массового возделывания этого растения. Получены экспериментальные подтверждения высокой биологической активности культивируемых корней, выращенных на плантациях в Приморье.

Все это дает основание ставить вопрос об организации женьшеневого совхоза — прежде всего в Приморском крае, в пределах естественного ареала распространения женьшеня. Предполагается, начиная с 1959 г., начать ежегодно освоение под питомники женьшеня по 2 га и под основные плантации по 10 га, с тем, чтобы с 1964—1965 гг. ежегодно производить сбор урожая корней с 10 га (всего 30 т).

По итогам работы 14-го расширенного заседания Женьшеневого комитета было принято разрешенное постановление. В целях дальнейшего расширения координирующей роли Женьшеневого комитета признано необходимым: а) установить более тесные связи с учеными КНР, КНДР и других стран, б) провести в конце 1958 г. очередное заседание Женьшеневого комитета с приглашением представителей Академии наук КНР и КНДР для участия в работе комитета, в) просить Бюро Отделения АН СССР о созыве в 1959 г. во Владивостоке Всесоюзного совещания по женьшеню.

Женьшеневый комитет утвердил докладную записку о создании женьшеневого совхоза в Приморском крае, обратился с просьбой в Президиум ДВФАН СССР рассмотреть вопрос об организации научно-производственного женьшеневого хозяйства на Горно-таежной станции и решил поставить в соответствующих организациях вопрос об охране естественных запасов дикорастущего женьшеня.

И. Ф. Беликов, И. Н. Брехман.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
26	1 (заголовок табл. 1)	Каталитическая	Каталитическая
47	27 сверху	(0—5 мм)	(0—0,5 мм)
51	Табл. 5, в головке	$Q_n \frac{\text{ккал}}{\text{км}^3}$	$Q_n \frac{\text{ккал}}{\text{мм}^3}$
59	4 снизу	$\bar{\eta} = \mu (c + \xi)$	$\bar{\eta} = \eta (c + \xi)$
60	3 сверху	$\frac{\partial I}{\partial C^2} = \int_S (\nabla \eta)^2 dS > 0$	$\frac{\partial I}{\partial C^2} = \int_S (\nabla \eta)^2 dS > 0$
63	6 снизу	из выражения 0,27—25	из выражения (4) 0,27—2,5
71	Табл. 2, графа 4	(16)	(6)
76	19 снизу	$\gamma^1, \gamma^2, \dots;$	$\gamma^1, \gamma^2, \dots;$
77	9 снизу		
89	Табл. 1, графы 10—11	20	203
112	Табл. 7 графа 8	12,9	19,9
115	21 сверху	до 300 тыс. в 1 мм	до 300 тыс. в 1 мм
115	Табл. 1, графа 7	1,9	2,9
132	Табл. 1, в головке	$\gamma \text{ м/л}$	$\gamma/\text{мл}$

Технический редактор Н. М. Потоцкая. Корректоры: Р. Э. Вильнер, Н. М. Савинская.

МН 02375. Подписано к печати 30 июля 1958 г. Тираж 1200. Заказ 91. Формат бумаги 70 × 108,16 мм = 4,25 бум. л., 11,64 печ. л. + 4 вклейки, 12,83 изд. л.

Новосибирское книжное издательство, Красный проспект, 18. Типография № 1 Полиграфиздата, Новосибирск, Красный проспект, 20. Цена 7 руб.

Handwritten mark

Цена 7 р.