

СССР—МПС
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

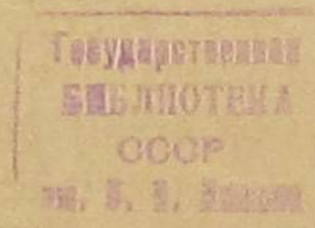
Кандидат технических наук ФУФРЯНСКИЙ Н. А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКОМОТИВНЫХ
ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

МОСКВА—1954

Экспериментальные исследования выполнены в лабораториях и на опытных образцах локомотивов в ЦНИИ МПС, эксплуатационные испытания проводились на Приволжской ж. д.



54-86729

„Приступить к производству новых мощных паровозов, электровозов и тепловозов, в том числе газогенераторных“ (Директивы XIX съезда партии по пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 годы).

1. Сравнение различных способов использования твёрдого топлива в локомотивах железнодорожного транспорта

Локомотивный парк железных дорог является одним из крупнейших в стране потребителей топлива. Поэтому понятно значение сокращения удельных расходов топлива действующим парком и создание новых экономичных локомотивов.

В настоящее время на железнодорожном транспорте эксплуатируются паровозы, электровозы и тепловозы. Одним из перспективных локомотивов ближайшего будущего является газотурбовоз.

Анализ термодинамических характеристик современных локомотивов железнодорожного транспорта, выполненный проф. Н. И. Белокозь, показал, что тепловая экономичность паровой тяги может быть повышена с переходом к высокому давлению и перегреву пара, применением вакуумной конденсации, подогревом питательной воды и воздуха и сокращением потерь с уносом. Применение указанных мероприятий повышает расчётный к. п. д. паровоза до 11—12%. Однако эксплуатационный к. п. д. таких локомотивов будет ниже. Таким образом, перспективы существенного повышения тепловой экономичности паровой тяги ограничиваются термодинамическими особенностями паросиловой схемы рабочего процесса.

Дальнейшее повышение к. п. д. паровой тяги может быть достигнуто лишь в новых термодинамических схемах. Электрификация железных дорог занимает, как известно, особое место в перспективах развития железнодорожного транспорта СССР. Коэффициент полезного действия электротяги определяется экономичностью электростанций, линий высоковольтной передачи, подстанций, контактной сети и электровоза. При к. п. д. современных тепловых электростанций, равном 25—28%, расчётный к. п. д. электротяги составляет 14—16%. Экономичность электротяги может быть повышена, главным образом, за счёт к. п. д. первичных электростанций. Электрификация становится рентабельной лишь при достижении определённой грузонапряжённости.

Современные успехи металлургии и разработка высокоэкономичных компрессоров позволили приступить к использованию газотурбинной техники в стационарной энергетике, железнодорожном, водном и автомобильном транспорте.

Уже в настоящее время расчётный к. п. д. газотурбинных локомотивов достигает 16—18%; при использовании современных достижений газотурбинной техники, к. п. д. газотурбинной установки может достигнуть значений, близких к. п. д. поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Существенным и принципиальным недостатком газотурбинных двигателей является их невыгодная характеристика при работе на частичных (неполных) нагрузках, что в условиях локомотивной службы будет значительно снижать эксплуатационный к. п. д. по сравнению с расчётным значением.

Сравнение тепловой экономичности различных видов локомотивов показывает, что наивысшей тепловой экономичностью отличаются тепловозы.

Расчётный коэффициент полезного действия современных отечественных тепловозов на жидком топливе достигает 28%, снижаясь в эксплуатации примерно до 24%. Однако существенным недостатком современных тепловозов является то обстоятельство, что до сих пор они могли использовать лишь жидкое топливо и притом строго определённого качества.

Паровоз, открывший эпоху бурного промышленного прогресса, отличается не только простотой конструкции, но и практически неограниченными возможностями использования различных топлив. Этим и объясняется жизнеспособность паровоза.

В то же время, современное развитие техники позволяет применить для поршневых двигателей внутреннего сгорания не только жидкое, но и газообразное топливо; еще большими возможностями применения различных топлив отличаются газотурбинные двигатели.

Таким образом, в результате развития локомотивной техники и современных успехов в области переработки твёрдых топлив, техники их сжигания и газификации, перед энергетиками транспорта возникла проблема использования твёрдых топлив в поршневых и газотурбинных двигателях внутреннего сгорания. Задача состояла в том, чтобы используя высокую тепловую экономичность современных тепловозных и газотурбинных двигателей, разработать способы применения в них твёрдых топлив.

Сравнение различных локомотивов по тепловой экономичности приведено в таблице 1.

Таблица 1

Тип локомотива	Коэффиц. полезного действия %	
	Расчётный или паспортный	Экспл. (действ. или ожидаемый)
Паровоз со всеми модернизационными мероприятиями	10	7,5—8,1
Паровоз серии Л; $N_e = 1950$ л. с.	7,2	5—6
Паровоз типа 1—4+4—2; $N_e = 4100$ л. с.	7,5	5—6
Электропоезд ВЛ-22-М; $N_e = 3250$ л. с.	15	—
8-осный $N_e = 5700$ л. с.	15	—
Тепловоз: $N_e = 1000$ л. с.	28	24
$N_e = 2000$ л. с.	28	24
$N_e = 4000$ л. с.	28—30	25
Газогенераторный тепловоз: $N_e = 1000$ л. с.	20	15—16
$N_e = 2000$ л. с.	20	15—16
Газотурбовоз на жидком топливе $N_e = 2470$ л. с.	15,5	12,5
$N_e = 4800$ л. с.	17	13,5
Газотурбовоз на твёрдом топливе (угольная пыль); $N_e = 4250$ л. с.	16,5	12

Проблема использования твёрдого топлива в локомотивах железнодорожного транспорта может решаться двумя путями:

а) непосредственное сжигание твёрдого топлива (пылеугольное отопление паровозов и газотурбовозов, слоевые топki паровых локомотивов и воздушных котлов газовых турбин);

б) предварительная переработка твёрдого топлива в жидкое или газообразное.

Превращение твёрдого топлива в газообразное может осуществляться непосредственно на локомотивах (индивидуальные локомотивные газогенераторные установки) или на центральных газостанциях (участковые пункты производства и сжатия газа, газобаллонные локомотивы).

Для сравнительной оценки различных способов использования твёрдого топлива были выполнены соответствующие расчёты, которые показали следующее.

Для обеспечения безэкипировочного пробега газобаллонного локомотива мощностью в 2000 л. с. на расстояние до 300 км с поездом в 2000 т, в зависимости от теплотворности газа, потребовалось бы израсходовать генераторного газа 16800 $нм^3$, или водяного 8400 $нм^3$, или коксового 5250 $нм^3$, или природного—2625 $нм^3$.

При давлении сжатия в 300—320 $атм$, общий вес баллонов, необходимых для обеспечения расчётного пробега локомотива на генераторном газе, составил бы около 200 т, на водяном 100 т, коксовом 62 т, природном 31 т; вместе с весом рамы, тележек, кассет, арматуры и обшивки общий вес газобаллонных тендеров приблизительно составит: для генераторного газа свыше 300 т, для водяного 180 т, коксового 100 т. Стоимость баллонов для оборудования одного локомотива на расчётный расход, например, коксового газа по действующим ценам составляет более 600 тыс. руб.

Следовательно, в техническом отношении газобаллонные локомотивы осуществить возможно, целесообразность же их применения определяется экономическими показателями. Если принять к. п. д. двигателя вместе с передачей 0,24, к. п. д. газостанции генераторного газа 0,7—0,75, а водяного газа 0,5—0,55, то общий расчётный к. п. д. использования твёрдого топлива при газификации его на генераторный или водяной газ с последующим сжатием и использованием в локомотивных двигателях (без вспомогательных расширительных машин и регенерации тепла) будет примерно равен 8,1—9,4%. В случае использования коксового газа с высоким к. п. д. генераторного процесса расчётная экономичность использования топлива в газобаллонных локомотивах несколько повышается, но всё же будет существенно ниже расчётной экономичности непосредственной газификации на локомотивных установках; по расходу металла и стоимости оборудования газобаллонный локомотив на коксовом газе также уступает газогенераторному тепловозу.

Если учесть, что организация хозяйства центрального газоприготовления и сжатия газа связана с сооружением предприятий большой металлоёмкости и стоимости, то показатели экономичности будут ещё в большей мере не в пользу применения сжатых газов. Применение сжатых газов может оказаться целесообразным лишь в специальных условиях (например,

в районах коксо-химических комбинатов, на трассах транспорта природного газа и т. п.).

Анализ современного состояния техники переработки твёрдого топлива в жидкое и достижений передовых предприятий искусственного жидкого топлива показал, что для выработки 1 т жидкого топлива методом синтеза моторных топлив расходуется 8—10 т твёрдого топлива теплотворностью 7000 ккал/кг, а методом гидрогенизации 5—7 т. Показатели эти изменяются при энергоснабжении от гидроэлектростанций (производство электроэнергии без затраты топлива).

Сравнение к. п. д. использования твёрдого топлива путём непосредственной газификации и методом гидрогенизации показывает, что для получения одного и того же количества тепла топлива (10000 ккал) в случае переработки твёрдого топлива в жидкое расходуется твёрдого топлива примерно в 2—2,5 раза больше, чем при непосредственной газификации. Если расчётный к. п. д. газогенераторных тепловозов составляет 20%, а эксплуатационный ~15%, то при переходе на искусственное жидкое топливо расчётный к. п. д. тепловоза, приведённый к общим затратам твёрдого топлива, понизился бы примерно до 8%, а эксплуатационный до 7%, что не отличается от к. п. д. современных паровозов. Однако, техника переработки твёрдых топлив делает успехи в повышении экономичности процессов и понижении стоимости целевых продуктов. Вместе с тем, повышается роль использования гидроэнергетических ресурсов для развития энергохимической промышленности. Поэтому экономические показатели различных способов использования твёрдых топлив не являются неизменными.

В настоящее же время непосредственная газификация твёрдого топлива на локомотивах отличается значительно более высокими экономическими показателями.

Таким образом, наряду с другими схемами комплексной переработки твёрдых топлив, непосредственная газификация на локомотивах, в сочетании с высокоэкономичными двигателями (поршневые двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины), является одним из перспективных путей использования твёрдых топлив на железнодорожном транспорте.

Масштабы и область применения газогенераторных тепловозов, как и других типов локомотивов, должны определяться для каждого конкретного района технико-экономическим расчётом.

2. Специфические особенности создания газогенераторных установок локомотивного типа

Локомотивные энергетические установки должны удовлетворять двум основным требованиям: развивать большую мощность при малых габаритах и сохранять устойчивые показатели при переменных режимах, характерных для условий локомотивной службы.

Для выбора метода газификации твёрдого топлива применительно к локомотивным двигателям были рассмотрены различные способы газификации: газификация под высоким давлением, в кипящем и взвешенном слое, с жидким и твёрдым (сухим) шлакоудалением, газификация кускового топлива в слое

кислородным и парокислородным дутьём и газификация сухим — воздушным и паровоздушным дутьём.

Газификация при высоком давлении, отличаясь большими возможностями в форсировании процесса, для локомотивных установок, в современных условиях, оказалась неприемлемой в силу сложности вспомогательного оборудования и больших расходов энергии на предварительное сжатие дутьевого воздуха.

Неприемлемой оказалась также газификация в кипящем и взвешенном слое и с жидким шлакоудалением. Аппараты, в которых газифицируется топливо во взвешенном или кипящем слое, отличаются большими удельными размерами, что не согласуется с требованиями железнодорожного габарита. Газификация с жидким шлакоудалением обеспечивается лишь при постоянном сохранении высоких температур в слое топлива. В то же время специфической особенностью службы локомотива является переменный и прерывистый режим нагрузок, что, следовательно, находится в противоречии с основным принципом организации рабочего процесса в газогенераторах с жидким шлакоудалением.

Газификация с кислородным или парокислородным дутьём обеспечивает как высокие форсировки, так и благоприятные показатели по теплотворной способности газа. Однако сложность оборудования и высокая стоимость получаемого газа не позволяют применить этот способ в условиях тягового железнодорожного хозяйства.

В результате сравнительной оценки современных методов газификации наиболее приемлемым оказался способ газификации кускового твёрдого топлива в слое воздушным и паровоздушным дутьём по прямому процессу с твёрдым (сухим) шлакоудалением.

Этот метод отличается высоким к. п. д. процесса, простотой конструктивного оформления, устойчивостью состава газа и свойств шлака при переменной скорости дутья.

Выборенный метод газификации, отличаясь указанными преимуществами, не мог, однако, без специальных исследований, найти применение в локомотивных установках. В соответствии с действующими нормами, слоевые газогенераторы с твёрдым шлакоудалением и паровоздушным дутьём проектируются на весовые форсировки поперечного сечения шахты в пределах 140—180 кг/м²час (по углероду топлива). Для создания слоевых газогенераторов локомотивного типа оказалось необходимым значительно превзойти уровень форсировок, достигнутый в газовой промышленности и в автотракторных установках.

Для определения размеров рабочей шахты газогенератора (d , м), необходимой и достаточной форсировки газогенератора (R кг/м²час) в зависимости от мощности (N_e л. с.) и к. п. д. двигателя (η_e), теплотворности газифицируемого топлива (Q_n , ккал/кг) и к. п. д. газификации (η_r) могут быть использованы следующие соотношения:

$$d = 28,4 \sqrt{\frac{N_e}{\eta_e \cdot \eta_r R Q_n}}$$
$$R = \frac{4 \cdot 632,3 N_e}{\pi d^2 \eta_e \eta_r Q_n}$$

Расчёты показали, что при действующих нормах форсировок в газовой промышленности, диаметр локомотивного газогенератора, в зависимости от мощности двигателя, характеризуется следующими величинами (табл. 2).

Таблица 2

Диаметр газогенератора, в зависимости от мощности локомотивного двигателя

Мощность локомотива ($\eta_r = 0,2$) л. с.	Внутренний диаметр газогенератора ($\eta_r = 0,7$) мм	Наружный диаметр газогенератора мм
1000	2200	2800
2000	3100	3700
3000	3700	4300
4000	4360	5000
5000	4900	5600
6000	5300	6000

Таким образом, при обычных форсировках, применяемых в стационарных газогенераторах, не представляется возможным осуществить газогенератор для перспективных тяговых двигателей. Кроме того, режимы низких форсировок газификации сопровождаются большой тепловой инерцией рабочего слоя топлива, что находится в противоречии с задачами обеспечения переменных нагрузок локомотивного двигателя.

По габаритным ограничениям железнодорожного подвижного состава и условиям обслуживания в эксплуатации необходимо было создать аппарат с внутренним диаметром шахты (d) не более 1,2—1,8 м. Если принять $\eta_e = 0,24$; $\eta_r = 0,7$ и $Q_n = 8100$ ккал/кг, то должно быть (таб. 3):

$$R_c = \frac{C}{d^2} N_e \text{ кг/м}^2 \text{ час}; \quad C = \frac{4 \cdot 632,3}{\pi \eta_e \eta_r Q_n} = 0,59.$$

Таблица 3

Необходимые форсировки слоя топлива локомотивного газогенератора по углероду (R_c кг/м² час)

N_e л. с.	1000	2000	3000	4000	5000
d_m					
1,2	410	820	1230	1640	2050
1,3	350	700	1050	1400	1750
1,4	300	600	900	1200	1500
1,5	260	520	780	1040	1300
1,6	230	460	690	920	1150
1,7	200	400	600	800	1000
1,8	180	360	540	720	900

Это значит, что проблема газогенераторного локомотива сводится к освоению форсировок газогенераторов порядка не менее 500—800 кг/м² час, т. е. выше действующих норм примерно в 3—4 раза. Теоретическому и практическому решению этой задачи в основном и посвящено настоящее исследование.

3. Теоретические и технологические предпосылки создания локомотивных газогенераторных установок

В Советском Союзе изучение процесса горения углерода топлива поставлено весьма широко и всесторонне. Исследования Семенова, Предводителя, Чуханова, Хитрина, Франк-Каменецкого, Чернышева, Кнорре, Померанцева, Колодцева, Канторовича, Каржавиной, Альтшулера, Лаврова и др. вскрыли многие, ранее неизученные явления. Теоретические схемы и математическое описание газообразования в слое, разработанные советскими учёными, существенно углубляют представления о закономерностях процессов горения и газификации топлива в слое и в некоторых частных случаях (специальные топлива) позволяют рассчитать поля концентраций газов по слою. Однако расчёты процесса газообразования в слое промышленного топлива (определение концентрации газов и температуры по высоте газифицируемой засыпки топлива, определение необходимой и достаточной высоты слоя, учёт влияния переменных нагрузок и др.) в настоящее время в необходимом объёме выполнить еще не представляется возможным.

В основу строгого описания всех процессов, имеющих место в реальных промышленных аппаратах, должны быть положены системы уравнений энергии, теплообмена, диффузии и химической кинетики, уравнений состояния неразрывности и движения. Однако, рассмотрение и решение столь сложной системы уравнений наталкивается в настоящее время на исключительные математические трудности. Поэтому практически приходится выбирать наиболее существенные из них и решать задачу приближенно, на основе исследования особенностей процесса газификации, т. е. приближенного аналитического метода.

Для создания локомотивных газогенераторных установок необходимо было провести следующие исследования:

а) Определить возможные границы повышения форсировки газификации кускового топлива в свободном плотном слое.

б) Выявить и исследовать зависимость между тепловой инерцией газифицируемого топлива и форсировкой, а также зависимость между производительностью испарителя газогенератора и форсировкой.

в) Исследовать газификацию топлива в слое на высоких форсировках и переменных нагрузках (изменение температуры и концентрации отдельных компонентов газа по высоте и сечению слоя, охлаждающее влияние стенок аппарата, определение необходимой и достаточной высоты активных зон газификации в зависимости от состава топлива и дутья).

г) Разработать способы очистки и охлаждения газа, приёмы питания установки воздухом, водой, паром, механического шлакоудаления, а также способы контроля и управления за работой аппаратов на переменных нагрузках.

д) На основании теоретических и экспериментальных исследований создать опытные образцы локомотивных газогенераторных установок и исследовать их рабочий процесс в эксплуатационной службе (состав газа, его очистка и охлаждение, тепловая инерция газогенератора, влияние газогенераторной установки на экономику локомотива, коррозионное воздействие газа на аппаратуру и др.).

Для определения возможного повышения форсировок при выбранном методе газификации (прямое дутье, кусковое топливо в свободном плотном слое) расчёт выполнялся по следующей схеме.

Предельное состояние равновесия (подъёмная сила газового потока равна весу частицы топлива):

$$P = \frac{CU^2}{2g\gamma} \frac{\pi\delta^2}{4} 10^{-6} \text{ кг},$$

$$G = \gamma_v \frac{\pi\delta^3}{6} 10^{-9} = \frac{CU^2}{2g\gamma} \frac{\pi\delta^2}{4} 10^{-6} \text{ кг},$$

$$\delta_{ун} = \frac{1500}{\gamma_v} \frac{CU^2}{2g\gamma},$$

где $\delta_{ун}$ — диаметр «взвешенной», «безусловно» уносимой частицы топлива, мм;

γ_v — истинный удельный вес топлива, кг/м³;

γ — удельный вес газов, кг/м³;

C — коэффициент лобового сопротивления, которое испытывает частица при подъёме в газовом потоке;

U — вертикальная составляющая весовой скорости газового потока, кг/м² сек;

Размер «безусловно» уносимых частиц топлива определяется в соответствии со скоростью газового потока, которая устанавливается на некотором расстоянии от зеркала отбора газа. Непосредственно из слоя газ выходит по свободным межкусковым пространствам; скорость местных струй газа существенно превышает среднюю скорость газового потока в свободном газоотборном пространстве. Отрыв отдельных кусков топлива из слоя определялся начальными скоростями струй газа; по мере падения скорости газовой струи, движение крупных частиц топлива, диаметр которых превышает диаметр «безусловно» уносимых кусков (инерционные частицы), замедляется, крупные частицы теряют скорость и возвращаются в слой.

Работа газового потока на участке произвольной высоты определяется по уравнениям, предложенным Н. И. Белконь:

$$\int_0^x p dx = \left[\frac{1}{1 + \frac{2x}{a} \operatorname{tg} \theta} \left(\frac{C_0 U_0^2}{2g\gamma} - \frac{CU^2}{2g\gamma} \right) + \frac{CU^2}{2g\gamma} \right] \frac{\pi\delta^2}{4} 10^{-9} \text{ кгм},$$

где U_0 и U — весовая скорость газового потока на выходе из слоя и средняя над слоем, кг/м² сек;

a — начальный диаметр струи (в пределе — диаметр уносимой частицы, м);

x — высота рассматриваемого сечения струи газа над поверхностью слоя, м;

θ — угол расширения струи газа;

C_0 и C — коэффициенты сопротивления.

На высоте h , соответствующей затуханию скорости частицы при подъёме, уравнение энергии частицы будет:

$$\int_0^h p dx = h\gamma_v \frac{\pi \cdot \delta^3}{6} 10^{-12} \text{ кгм}.$$

Отсюда связь между диаметром частицы (δ мм) и высотой её предельного подъёма над слоем (h мм).

$$h = \frac{\delta_{\max} - \delta}{\delta - \delta_{ун}} \frac{\delta}{2 \operatorname{tg} \theta} \text{ мм},$$

где $\delta_{ун}$ — диаметр наибольших «безусловно» уносимых частиц;

δ_{\max} — предельный диаметр частиц, поднимаемых газовыми струями над поверхностью слоя ($\lim h = 0$).

Выполненные расчёты позволили сделать следующие выводы.

а) Форсирование газификации кусковых топлив в свободном слое можно осуществлять в широких пределах. Существующие нормы тепловых нагрузок слоевых газогенераторов могут быть превышены в несколько раз и при отсутствии других ограничений могут быть доведены до высоких нагрузок (табл. 4).

Таблица 4

Расчётные форсировки газификации топлива в свободном слое в зависимости от размера кусков топлива

δ мм	U_k^c ккал/м ² час	R_c кг/м ² час
3—6	~ 7.10 ⁶	800—900
6—13	10.10 ⁶	1200
13—25	14.10 ⁶	1750
25—50	23.10 ⁶	2600

б) Увеличение уноса топлива, которое наблюдается с повышением форсировок и нередко ограничивает нагрузки, можно избежать двумя путями: применением топлив, фракционированных по размеру кусков, и соответствующим конструктивным оформлением газогенератора. Вследствие того, что отрыв кусков топлива из слоя определяется скоростью выхода газа из слоя, а унос топлива — средней скоростью газа над слоем, необходимо развигать поверхность (зеркало) отбора газа и высоту свободного пространства над слоем. Высота свободного пространства над слоем должна превышать высоту подъёма кусков топлива размером $\delta > \delta_{ун}$.

Анализ различных конструктивных схем газогенераторов показал, что в локомотивных условиях целесообразно применить газогенераторы с ох-

лаждающей шахтой и пароводяной рубашкой. Однако, в газогенераторах, осуществленных по такой схеме, переход к высоким форсировкам мог лимитироваться паропроизводительностью испарителя.

Уравнение связи между форсировкой шахты газогенератора и паропроизводительностью:

$$U = \frac{D}{B} = \frac{\kappa H(t - \tau_k)}{i_1 - i_0} \eta \frac{Q_n}{U_k R_{ш}} = \frac{\kappa(t - \tau_k)}{i_1 - i_0} \eta \frac{Q_n}{U_k} \cdot \frac{4h}{d} = C \frac{\kappa}{d} h,$$

где U — удельная паропроизводительность топлива, $кг/кг$;

D — количество пара, вырабатываемое в испарителе (пароводяной рубашке) газогенератора, $кг/час$;

B — расход топлива, $кг/час$;

H — поверхность нагрева испарителя, $м^2$;

h — высота испарителя, $м$;

κ — коэффициент теплопередачи, отнесенный к расчетной разнице температур $(t - \tau_k)$, $ккал/м^2 \text{ час } ^\circ C$;

η — к. п. д. испарителя;

i_1, i_0 — теплосодержание пара и питательной воды, $ккал/кг$;

Q_n — низшая теплотворность топлива, $ккал/кг$;

$R_{ш} = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь поперечного сечения рабочей шахты, $м^2$;

U_k — тепловая форсировка газогенератора, $ккал/м^2 \text{ час}$.

Следовательно, удельная паропроизводительность (U) испарителя есть величина обратно пропорциональная диаметру (d) шахты газогенератора. В опытной части работы были получены значения коэффициента теплопередачи (κ), что позволяет при проектировании газогенераторов рассчитывать испарители. Лабораторными и эксплуатационными исследованиями установлено, что имеется практическая возможность повысить интенсивность испарителей газогенераторов в несколько раз, доведя паросъем до величины порядка $150 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$, что обеспечивает ведение процесса газификации на паровоздушном дутье во всей практически важной области форсировок.

В стационарных газогенераторах, работающих с постоянной нагрузкой, охлаждающее влияние стенок на процесс газообразования оказывает лишь небольшое влияние.

В условиях переменных и прерывистых нагрузок, характерных для локомотивной службы, охлаждение слоя топлива через охлаждаемые стенки может оказать решающее влияние на тепловую инерцию и высоту активного слоя топлива, в котором должны завершаться реакции газообразования. Учет влияния пристеночного (рантового) газа на суммарный процесс газификации может привести и, как показали экспериментальные исследования, приводит к существенному изменению схемы подвода дутья и отвода газа из слоя.

Для исследования влияния охлаждающего воздействия стенок на распределение температур в слое в работе приводится вывод безразмерного параметра $\pi_t = \frac{t - \theta}{t_a - \theta}$, который характеризует отношение разности между

температурой в рассматриваемой точке слоя и температурой окружающей среды $(t - \theta)$ к разности температур в центре слоя и той же температурой $(t_a - \theta)$. Теоретическое исследование изменения параметра показывает его зависимость от $\frac{\bar{\lambda}}{\kappa r}$ — отношения приведенного коэффициента теплопроводности слоя ($\bar{\lambda}$) к произведению коэффициента теплопередачи (κ) на

расстояние от оси газогенератора (r).

Получено выражение общей зависимости распределения температур в слое горящего (газифицируемого) топлива, окруженного цилиндрической стенкой. Для количественной оценки распределения температур в слое необходимо было определить $\bar{\lambda}$ и κ .

Величина коэффициента теплопередачи (κ) определена из опыта; следовательно, задача сводилась к выявлению приведенного коэффициента теплопроводности слоя.

Для расчета $\bar{\lambda}$ было использовано решение, которое приводит Б. М. Канторович.

$$\bar{\lambda} = \frac{md}{\frac{(1-\zeta)d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} + (1-m) \lambda, \quad (a)$$

где ζ — опытный коэффициент $\zeta = 1,7$ ($m = 0,25$);

m — порозность;

d — средний диаметр кусков газифицируемого топлива;

λ — коэффициент теплопроводности газифицируемого топлива.

Коэффициент лучистого теплообмена в указанном решении принимается

$$\alpha_n \approx 2 \cdot 10^{-7} \theta^3.$$

С другой стороны, приведенный коэффициент теплопроводности ($\bar{\lambda}$) может быть получен из выражения безразмерного параметра:

$$\pi_\lambda = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_0} = \frac{\alpha(t - t_k)}{\lambda_0 m \operatorname{tg} \varphi} = \frac{q}{\lambda_0} \cdot \frac{1}{\operatorname{grad} \theta}, \quad (б)$$

где $\bar{\lambda}$ — приведенный коэффициент теплопроводности слоя;

λ_0 — коэффициент теплопроводности газифицируемого топлива;

α — коэффициент теплоотдачи от слоя в охлаждающую среду;

θ — температура в слое топлива;

t_k — температура охлаждаемой стенки;

m — масштаб графика;

φ — угол, образованный касательной к кривой температуры в пристеночном слое;

$\operatorname{grad} \theta$ — градиент температуры в пристеночном слое топлива.

Из последнего соотношения на основе опытных данных определяется приведенный коэффициент теплопроводности слоя ($\bar{\lambda}$), а также соответствующий симплекс (π_λ) с учетом тепловыделения химических реакций, протекающих в пристеночном слое газогенератора.

Сравнение расчетных значений $\bar{\lambda}_p$ (соотношение «а») полученных без учета тепловыделения химических реакций и действительных значений $\bar{\lambda}_0$.

(соотношение «б»), полученных из опытных данных приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Расчётное значение приведённого коэффициента теплопроводности слоя ($\bar{\lambda}_p$)

Температура °C	$\bar{\lambda}_p$					
	$d=0,01$			$d=0,025$		
	$m=0,3$	$m=0,5$	$m=0,7$	$m=0,3$	$m=0,5$	$m=0,7$
100	—	0,089	0,093	0,101	0,105	0,15
300	0,104	0,118	0,179	0,109	0,135	0,252
500	0,110	0,134	0,25	0,111	0,144	0,281
700	0,111	0,143	0,299	0,113	0,148	0,330
1000	0,112	0,146	0,333	0,113	0,15	0,348
1200	0,112	0,148	0,346	0,113	0,15	0,352

Таблица 6

Значение $\bar{\lambda}_0$ в пристеночном слое топлива в зависимости от форсировки газогенератора

Форсировка газогенератора		Температура °C		Среднее значение $\frac{\text{grad } \Theta}{\text{по высоте испарителя}}$	$\bar{\lambda}_0$ ккал/м ² час °C
По антрациту кг/м ² час	по теплу $U_k 10^{-6}$ ккал/м ² час	В слое (макс.)	у стенок по высоте испарителя		
300	1,92	1200	400—600	7600	4,2
690	4,41	1200	400—600	11250	6,5
800	5,12	1320	480—850	12100	7,9

Существенно важно отметить резкое различие расчётной ($\bar{\lambda}_p$) и опытной ($\bar{\lambda}_0$) величин приведённого коэффициента теплопроводности; основную роль в этом случае играют процессы тепловыделения в слое, нарушающие теоретическую схему, по которой обычно делались попытки определения $\bar{\lambda}$ расчётом. Подтверждением служит явно выраженная зависимость $\bar{\lambda}$ от форсировки.

4. Результаты лабораторных исследований

Лабораторные исследования были проведены на антраците при форсировках до 820 кг/м²час, на буром угле до 1700 кг/м²час. Начальный размер кусков топлива во всех испытаниях составлял 6—13 мм. Состав дутья варьировался в широком диапазоне (сухое воздушное дутьё, паровоздушное, воздушное дутьё с присадкой CO₂ и пониженной концентрацией кислорода). Лабораторными исследованиями установлено нижеследующее.

а) Антрацит на паровоздушном дутье можно газифицировать в слое при высоких форсировках, превышающих фактические показатели промышлен-

ных газостанций в 4—5 раз. В пределах исследованных форсировок ограничений по качеству газа не обнаружено. С повышением форсировок качество газа не ухудшалось. Таким образом, экспериментально доказана несостоятельность теории о невозможности значительного форсирования слоевых газогенераторов на антраците паровоздушным дутьём с твёрдым шлакоудалением.

Высота (длина) кислородной зоны при сухом и паровоздушном дутье наблюдалась примерно одинаковой при всех форсировках и была равна 4,5—6,5 начальным средним диаметрам газифицированного антрацита. Высота активной части восстановительной зоны при сухом дутье увеличивается с уменьшением начальной концентрации кислорода в дутье и сокращается с увеличением форсировки. При паровоздушном дутье форсировка не оказывает заметного влияния на длину восстановительной зоны.

Опытами установлено, что для завершения активного процесса восстановления CO₂ необходима следующая высота слоя топлива: при сухом дутье 15—20, а при паровоздушном 10—14 средних начальных диаметров кусков газифицируемого антрацита.

При газификации бурых углей сухим дутьём высота активных зон значительно короче, чем при газификации антрацита и составляет: окислительная зона около 3—4, восстановительная около 4, суммарная примерно 7—8 средних начальных диаметров газифицируемого топлива. Следует подчеркнуть, что измерение длины зон отношением полученной длины к начальным диаметрам кусков газифицируемого топлива носит условный характер; это особенно относится к бурым углям, которые в процессе тепловой подготовки и в рабочих зонах значительно измельчаются.

Динамика газообразования в восстановительной зоне при паровоздушном дутье существенно отличается от процессов, идущих при сухом дутье. Если при сухом дутье допустимо говорить о прямолинейной зависимости

$$\lg \frac{C_x + C_2}{C_0} = f(h), \text{ то при паровоздушном дутье та же функция принимает отчётливо выраженную степенную зависимость. Замечается, что кривая } \lg \frac{C_x + C_2}{C_0} \text{ имеет два перелома, один в начале восстановительной}$$

зоны, когда восстановление CO₂ в CO протекает наиболее бурно, и второй — в конце зоны, где процесс восстановления затухает.

Таким образом можно констатировать, что газообразование при паровоздушном дутье отличается от газообразования при сухом дутье по всей высоте активного слоя топлива как в окислительной, так и в восстановительной зонах.

б) Установлено, что реакции образования водорода из паров воды и влаги топлива завершаются над кислородной зоной. Пар дутья охлаждает кислородную зону таким же образом, как и прочие балластные составляющие дутья (N₂, CO₂).

Общепринятая оценка суммарной высоты активных зон по степени завершенности процесса восстановления CO₂ для промышленных топлив и промышленных аппаратов неприменима. Суммарная высота должна оцениваться по завершению всех процессов газификации, в частности, по высоте,

которая обеспечивает наиболее полный выход водорода. При высоте слоя топлива, обеспечивающего восстановление CO_2 (15—20 начальных диаметров газифицируемого антрацита—сухое дутьё) выход водорода завершается на высоте в 23—25 диаметров. Еще более резкая разница получается при газификации сухим дутьём бурого угля. Здесь процессы восстановления углекислоты завершаются на высоте 7—8 начальных диаметров, а выход водорода на высоте в 20—22 диаметра. Суммарная высота зон при газификации антрацита паровоздушным дутьём, определяемая по завершению выхода водорода, в 1,5—2,0 раза больше соответствующей высоты, достаточной на восстановление CO_2 .

в) Обычно высота активных зон определяется по составу газа в слое топлива, удалённому от стенок исследуемого аппарата. Влияние краевого газа на суммарный эффект газификации не учитывается. Между тем, промышленные аппараты, как правило, работают с топливниками, охлаждаемыми водой. До сих пор считается, что при отношении диаметра аппарата (D) к среднему начальному диаметру кусков топлива (d) порядка $D:d > 20$ краевой (рантовой) газ существенно не влияет на суммарный эффект газификации. Лабораторные исследования проводились при соблюдении указанных условий ($D:d > 30$).

Результаты исследования указывают на весьма существенное влияние краевого газа. В реальных условиях зоны располагаются по сечению перпендикулярному направлению дутья лишь в слое, удалённом от охлаждающих стенок на расстояние в 3—4 начальных диаметра газифицируемого топлива. У стенок аппарата зоны значительно растягиваются, кислород проникает на высоту в 5—7 раз превышающую высоту кислородной зоны глубинного слоя топлива.

Низкие температуры, господствующие непосредственно у стенок аппарата, не обеспечивают развитие активных процессов горения, вследствие чего кислород дутья вдоль стенок проникает в весьма высокие слои топлива, что облегчается и повышенной порозностью периферийного кольца. Вследствие проникновения кислорода по внешнему кольцу топлива в верхние слои, на некотором расстоянии от стенок происходит окисление горючих компонентов газа, что ухудшает суммарный эффект газификации. В исследованном аппарате снижение теплотворной способности суммарного газа против слоевого составляло 17—30%.

При проектировании промышленных аппаратов должно учитываться влияние краевого газа; высота активных зон должна выбираться не по завершению реакций газообразования в слое и тем более не по высоте достаточной для образования окиси углерода, а по её высоте у стенок с учётом завершения образования водорода.

г) В противоположность господствующему мнению о вредном влиянии высокого слоя на газификацию (вследствие обратных реакций) установлена положительная роль высокого слоя (в условиях исследованных аппаратов). Процесс образования окиси углерода и водорода продолжается и за пределами, так называемой, зоны восстановления. Положительное влияние большой высоты слоя сказывается также и на улучшении тепловой подготовки топлива.

Для тепловой подготовки 1 кг антрацита необходимо и достаточно за-

тратить около 300—400 ккал; при этом установлено, что в обычных условиях прямого процесса тепловая подготовка завершается в течение 10—12 минут. Минимальная продолжительность пребывания топлива в подготовительной зоне, с учётом высоты собственно активных реакционных зон, выбранных согласно предыдущим указаниям, определяют конструктивную высоту рабочей части аппарата. В промышленных аппаратах нет смысла сокращать высоту отбора газа, как это нередко делается; наоборот, целесообразно её повышать, руководствуясь при этом лишь желаемым уровнем тепловой подготовки и допустимыми потерями на преодоление сопротивления слоя топлива.

д) Тепловая инерция слоя топлива зависит от весовой форсировки и не зависит от конструктивной высоты отбора газа. Поэтому следует признать несостоятельной общепринятую оценку транспортных газогенераторов по так называемой литровой мощности газогенератора, т. е. по объёму топлива рабочей шахты, отнесённому к мощности силовой установки. Действительной оценкой тепловой гибкости (приёмистости) является не литровая мощность газогенератора, а отношение площади колосниковой решетки (или площади активного сечения газогенератора) к мощности силовой установки.

5. Работа локомотивной газогенераторной установки на переменных нагрузках

Выбор принципиальной схемы газогенераторного локомотива определился следующими требованиями:

а) Газогенераторный локомотив, независимо от изменения качества газа, должен развивать полную мощность.

б) Газогенераторная установка локомотива должна работать под некоторым избыточным давлением (условия безопасности при нарушении плотности соединений, уменьшение уноса топлива при высоких форсировках), а её нагрузочный режим и регулирование должны согласовываться с переменным режимом работы двигателя.

в) Топливоподача, золоудаление, питание водой и паром, охлаждение и очистка газа должны быть автоматизированы и обеспечивать двигатель газом при переменных температурах наружного воздуха и при любых скоростях движения локомотива.

В работе рассмотрены различные схемы газогенераторного локомотива; на первых этапах создания газогенераторного локомотива была принята схема комбинированного питания двигателя газом и жидким топливом. В этом случае генераторный газ является основным, а жидкое — вспомогательным топливом.

Жидкое топливо выполняет две функции: является средством воспламенения газозооной смеси в цилиндрах, а при ухудшении качества газа компенсирует недостаточность теплового заряда и тем самым сохраняет номинальную или необходимую мощность двигателя.

На основе учёта специфических требований, предъявляемых к локомотивным газогенераторным установкам и приведённых в работе теоретических и лабораторных исследований, а также промышленного опыта, были спроектированы и построены газогенераторные установки к локомотивам мощностью в 1000 и 2000 л. с. (тепловозы ТЭ-1 и ТЭ-4).

Газогенераторные установки включают газогенератор, первые очистители газа от механического уноса (циклонные очистители) трубчатые холодильники и вторичные фильтры газа, систему автоматического питания газогенератора топливом, водой, воздухом и паром, устройства механического шлакоудаления, приборы контроля за давлением и температурой газа и дутья, уровнем воды, давлением пара в испарителе газогенератора и систему устройств по пуску установки и технике безопасности.

В стендовых и эксплуатационных испытаниях исследовались различные типы локомотивных газогенераторов: газогенераторы с диаметром шахты $D=1000$ и 1200 мм для тепловозов мощностью 1000 л. с. и газогенератор $D=1750$ мм для тепловоза мощностью в 2000 л. с.

Исследования проводились на антрацитах сорта АМ различных месторождений, на смесях антрацитов с журинским полукоксом и на полукоксе. В стендовых и эксплуатационных испытаниях исследования выполнялись в диапазоне следующих нагрузок (табл. 7).

Таблица 7

Форсировка газогенераторов в стендовых и эксплуатационных испытаниях

Максимальные форсировки	Стендовые испытания	Эксплуатационные испытания
Тепловая форсировка млн. ккал/м ² час шахта газогенератора зеркало отбора газа	4,35 25,0	3,85 22,2
Весовая форсировка (по антрациту) кг/м ² час шахта газогенератора зеркало отбора газа	625 3600	550 3200

Приведённые значения тепловых и весовых нагрузок были получены в длительных испытаниях эксплуатационных образцов газогенераторов: более высокие значения форсировок получены в лабораторных исследованиях (820 кг/м² час по антрациту и до 1700 кг/м² час по бурому углю). Сопоставление результатов лабораторных и эксплуатационных исследований с теоретическим расчётом (табл. 4) позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего повышения форсировок шахты газогенератора при газификации кускового топлива в свободно-лежащем слое.

Таким образом, представляется возможным рекомендовать к промышленному применению не только достигнутые нами в эксплуатации средние форсировки слоя газифицируемого кускового топлива, но и перейти к более высоким значениям тепловых нагрузок шахты порядка $U_k = 7 - 10 \cdot 10^6$ ккал/м² час.

Установлено, что в промышленных газогенераторах большой производительности, какими являлись испытанные локомотивные газогенераторы, распределение температур и концентраций газа по сечению слоя топлива подчиняется следующей закономерности; температуры возрастают от стенок к оси шахты; градиент температур в направлении от стенок в слой топлива понижается и на некотором расстоянии температуры выравниваются. Нерав-

номерность температурных полей существенно увеличивается на переменных нагрузках. Поля концентраций газа по сечению слоя в определённой мере согласуются с ходом температурных кривых. В пристеночном слое обнаруживаются значительные концентрации кислорода, который проникает в верхние слои топлива; практически полное расходование кислорода у охлаждаемых стенок наступает на высоте в $5-6$ раз превышающей высоту, на которой завершается поглощение кислорода в слоях, удалённых от стенок.

Влияние пристеночного эффекта на суммарный состав газа возрастает с увеличением теплопроводности стен и в случае переменных нагрузок. Уменьшение тепловой инерции газогенератора можно достигнуть следующими приёмами; понижением теплопроводности ограждающих стен; компенсацией теплопотерь (увеличением тепловой нагрузки) в периферийном слое топлива; пропуском пристеночного (рантового) газа через раскалённый слой топлива. Уменьшение тепловой инерции с помощью изоляции шахты газогенератора ухудшает шлаковый режим и затрудняет получение пара, необходимого для процесса газификации с твёрдым шлакованием; поэтому такой приём оказывается практически мало пригодным. Второй способ — увеличение тепловой нагрузки в периферийном слое топлива можно осуществить применением специальных колосниковых устройств, распределяющих воздух по сечению слоя в соответствии с выбранными условиями. Нами было применено конструктивно наиболее простое решение: пропуск пристеночного газа через раскалённый слой топлива (центральное расположение газоотборного устройства).

Установлено, что тепловая инерция газифицируемого топлива зависит, главным образом, от температурных условий, которые устанавливаются в периферийных слоях топлива. Так, не только после кратковременных, но и после весьма длительных стоянок, температура в слое, удалённом от стенок и колосниковой решётки, поддерживается на уровне, обеспечивающем быстрое восстановление процесса газификации ($1000 - 1200^\circ\text{C}$). Однако, период стабилизации после стоянок увеличивается вследствие необходимости прогрева периферийного топлива. Для сокращения продолжительности периода стабилизации предварительный прогрев топлива необходимо производить сухим воздушным дутьём.

Применяя предварительную (до включения двигателя) продувку газогенератора сухим дутьём, удалось сократить период стабилизации газа после длительных стоянок вдвое, а продолжительность периода стабилизации газа после кратковременных стоянок ($20 - 40$ мин.) сократить с 6 до 2 мин.

Дальнейшее уменьшение тепловой инерции газогенератора можно достигнуть увеличением производительности продувочного вентилятора и применением направленного дутья. После того, как в основной рабочей массе топлива температуры достигают необходимого уровня, окончательная стабилизация состава газа наступает лишь в случае, когда в испарителе вырабатывается пар в количестве, достаточном для нормального увлажнения дутья. В эксплуатационных условиях, в периоды пуска и резкого повышения нагрузок, соотношение между количеством вырабатываемого пара и необходимым количеством его для газификации нередко нарушается, поэтому теплотворность газа может оказаться недостаточной для обеспечения задан-

ной мощности двигателя, что приводит к временному нарушению теплового процесса двигателя и повышению расхода жидкого топлива. Для ликвидации указанного недостатка рекомендуется увлажнять дутьё с помощью специального распылителя воды, который должен включаться в периоды работы газогенератора с недостатком пара.

Как в условиях стационарного режима газификации, так и на переменных нагрузках, состав газа зависит от количества пара подаваемого в дутьё. В работе приводятся оптимальные соотношения между количеством воздуха и пара.

Существенным требованием, которое предъявляется к локомотивным газогенераторным установкам является сохранение постоянства качества газа на переменных режимах нагрузок. Проверенные в эксплуатации регуляторы паровоздушной смеси, поддерживающие постоянство температуры насыщения воздушного дутья паром, с принципиальной стороны удовлетворяют поставленным условиям. Однако, опыт эксплуатации показал, что при сохранении постоянного соотношения в дутье между количеством воздуха и пара, концентрации компонентов газа при смене нагрузок могут несколько изменяться (изменение коэффициента разложения пара).

Отсюда возникает необходимость в дальнейшем улучшении двух аппаратов: во-первых, необходимо, чтобы органы регулирования двигателя обеспечивали изменение соотношения между газом и воздухом, подаваемым в двигатель и, во-вторых, целесообразно ввести дополнительный корректор в конструктивную схему парового регулятора.

6. Основные показатели эксплуатации газогенераторных тепловозов при работе двигателей по газожидкостному процессу.

Газогенераторные тепловозы с момента ввода их в регулярную эксплуатацию (апрель 1952 г.) по настоящее время (август 1954 г.) сделали общий пробег более 750 тыс. км., перевозки, выполненные отдельными тепловозами, превысили 150 млн. ткм.

Расчёт показал, что при выбранной схеме локомотива (дизель Д-50, турбовоздуховка двигателя одновременно питает воздухом двигатель и газогенераторную установку) химического тепла газа, поступающего в цилиндры, достаточно для развития примерно 90% номинальной мощности двигателя; недостающее количество тепла компенсируется жидким топливом. Следовательно, при соблюдении расчётных показателей двигатель локомотива мог бы работать с расходом жидкого топлива, не превышающим 10% от расхода на максимальной мощности; на всех прочих нагрузках удельный расход жидкого топлива был бы соответственно меньше. Для подачи в цилиндры двигателя столь небольшого количества жидкого топлива необходимо было разработать новую топливную аппаратуру и провести соответствующую модернизацию дизеля. Решение этой группы вопросов не входило в круг наших исследований; изучению теплового процесса двигателя посвящены специальные работы.

В первых партиях газогенераторных тепловозов применялись серийные двигатели Д-50, которые оборудовались для работы на смешанном (бинарном) топливе без изменений конструкции дизеля и топливной аппаратуры.

Поэтому минимальный расход жидкого топлива газогенераторными тепловозами определялся минимальной производительностью серийной топливной аппаратуры и составлял примерно 15—25% от расхода при работе двигателя на одном жидком топливе. Кроме того, двигатели первых партий газогенераторных тепловозов были приспособлены для работы на смешанном топливе лишь на средних и больших нагрузках; на холостом ходу и малых нагрузках тепловозы работали на жидком топливе. Всё это, вместе с эксплуатационными особенностями работы локомотивных двигателей (маневровая служба, резервные пробеги, обслуживание сборных и неполновесных поездов, стоянки на промежуточных и оборотных пунктах) повышало удельные средне-месячные расходы жидкого топлива. Тягово-эксплуатационные испытания, которые проводились в условиях нормальной эксплуатации, выявили следующие показатели работы газогенераторного тепловоза ТЭ-1 мощностью в 1000 л. с. (см. таблицу 8).

Таблица 8

Эксплуатационные показатели работы газогенераторного тепловоза мощностью 1000 л. с.

№№ п/п.	Наименование	Размер- ность	Величина
1	2	3	4
1	Средний суммарный расход условного (7000 ккал/кг) топлива на измеритель работы (10 ⁴ ткм брутто)	кг/10 ⁴ ткм	59,35
	В том числе: твёрдого	"	49,2
	жидкого	"	10,15
2	Расход жидкого топлива по отношению к фактическому расходу серийными тепловозами	%	27,5
3	Коэффициент полезного действия локомотива	%	14,6—15,6
4	Коэффициент полезного действия газогенераторной установки в поездной работе . . .	%	76,1
5	Эксплуатационный коэффициент полезного действия газогенераторной установки (с учётом расхода топлива на промежуточных станциях, в основном и оборотных депо)	%	66%
6	Расход воды на 1 кг натурального твёрдого топлива	кг/кг	0,73
7	Температура газа за газогенератором . . .	°C	460—550
8	Температура газа перед двигателем (при температуре наружного воздуха 20—24°C) . . .	°C	45—50
9	Гидравлические потери в газовоздушном тракте—всего	мм в ст.	400—650
	в том числе:		
	а) газогенератор	мм в ст.	150—200
	б) холодильники вместе с циклонами . . .	"	100—120
	в) вторичные фильтры	"	120—300
	г) соединительные воздушные и газовые трубопроводы	"	30
10	Теплотворная способность газа, низшая:	ккал/нм ³	
	а) в пусковой период	"	800—900
	б) в установившемся режиме	"	1200—1300
	в) средне-эксплуатационная	"	1150

Участок, на котором работают газогенераторные тепловозы, ранее обслуживался паровозами серии Ш^а. Согласно отчетным данным дороги паровозы серии Ш^а расходовали на измеритель топлива в 4—5, а воды примерно в 50 раз больше, чем газогенераторные тепловозы.

Средне-эксплуатационный к. п. д. газогенераторной установки ниже поездного к. п. д., поэтому основным резервом повышения экономичности прежде всего является улучшение эксплуатационного использования газогенераторных локомотивов (сокращение простоя, резервных пробегов и т. п.). К. п. д. может быть повышен также сокращением расхода топлива при простоях в горячем состоянии, а также уменьшением потерь со шлаками и в провале при шуровках.

Опыт эксплуатации показал, что экономичность газогенераторных тепловозов зависит от гидравлических потерь в газовоздушном тракте. Увеличение сопротивлений в системе, которое происходит по мере загрязнения холодильников и фильтров, сопровождается падением производительности турбонагнетателя, что приводит к ухудшению продувки и наполнения цилиндров двигателя воздухом и газом, увеличению присадки жидкого топлива и росту температур отработавших газов. Установлено, что при увеличении гидравлических потерь в газовоздушном тракте с 25 до 100 мм рт. столба, расход жидкого топлива увеличивается в 2,5—2,6 раза, а температура отработавших газов повышается на 75—85°C.

Для предупреждения ненормальностей в работе газогенераторной и силовой установки локомотива вторичные фильтры рекомендуется промывать через 5—6 тыс. км. пробега, а трубчатую часть холодильников — через 10—12 тыс. км.

В результате лабораторных исследований и длительной эксплуатации установлено, что при надлежащей очистке газа от механических примесей износ двигателя, работающего на смешанном топливе, может не превышать износа серийных двигателей. Опыт эксплуатации также показал, что основные детали двигателя (поршни, втулки цилиндров, коленчатый вал и др.) в атмосфере генераторного газа работают удовлетворительно; активного развития коррозионного износа этих деталей не обнаружено.

В итоге лабораторных и длительных эксплуатационных исследований выявлена интенсивность коррозионного износа газового тракта. Наиболее агрессивно воздействует генераторный газ на участках между генератором и второй секцией холодильника; в дальнейшем, по мере охлаждения газа, интенсивность коррозии существенно уменьшается. Уменьшение интенсивности коррозионного износа наблюдается на протяжении всего тракта, где температура газа превышает температуру конденсации паров воды, содержащихся в газе и насыщающих его при этой температуре. По мере дальнейшего охлаждения газа в холодильниках, газопроводах и вторичных фильтрах, пары воды конденсируются; на этих участках интенсивность коррозионного износа газового тракта снова увеличивается.

В соответствии с выявленным характером коррозионного износа, рекомендуется изготавливать газоотборный патрубок, циклонные очистители и первую секцию холодильника (область температур выше 250°C) из металлов повышенной жаро и кислотостойкости (нержавеющие, среднелегированные стали), вторичные фильтры и последующие элементы газового тракта

(область температур ниже 250°C) из углеродистой стали, причём рекомендуется защищать внутреннюю поверхность антикоррозионными покрытиями (например, лак Ф—5, битум, смола и др.).

Опыт эксплуатации показал, что созданная газогенераторная установка локомотивного типа может работать неограниченно длительный период без повторных перезарядок и растопок; разработанное шлакоудаляющее устройство обеспечивает механическое удаление шлаков, рыхление слоя топлива и заданное распределение дутья по сечению рабочей шахты.

7. Заключение

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить качественную и количественную характеристику процессов газификации натуральных топлив в слое при высоких форсировках и переменных режимах в аппаратах промышленных размеров и расширить область применения газификации кускового топлива.

Для решения проблемы газогенераторного тепловоза необходимо было прежде всего выявить зависимость высоты активных зон газификации от состава топлива и дутья; определить факторы, влияющие на тепловую инерцию газифицируемого топлива и способы сокращения периода стабилизации состава газа при переменных нагрузках; выявить теплопроводность пристеночного слоя топлива, процессов, протекающих в этом слое и паропроизводительность испарителя в зависимости от форсировки газогенератора. Оказалось необходимым исследовать способ очистки и охлаждения газа, а также влияние газа на двигатель и газогенераторное оборудование. На основании проведенных исследований были созданы газогенераторные установки для локомотивов и построены две партии газогенераторных тепловозов мощностью в 1000 л. с. и опытный образец мощностью в 2000 л. с. Тягово-теплотехнические исследования и длительные наблюдения за работой опытных газогенераторных локомотивов мощностью в 1000 и 2000 л. с. в эксплуатационных условиях показали их высокую тепловую экономичность и удовлетворительные эксплуатационные качества.

Дальнейшее улучшение принципиальной схемы локомотива и теплового процесса газосиловой установки вызывает необходимость провести дополнительные исследования в области понижения тепловой инерции газогенератора, увеличения срока службы отдельных аппаратов установки, усовершенствования приборов автоматического контроля и управления, защиты элементов газосиловой установки от коррозии и перехода к созданию специальных локомотивных двигателей, которые могли бы надёжно работать без присадки жидкого топлива по чисто газовому процессу.

Л 157406. Сдано в набор 30/X-1954 г. Подписано к печати 5/XI 1954 г.
Формат бумаги 60×92 $\frac{1}{16}$ л. Объем 1,5 п. л. Заказ 690. Тираж 100.
Типография ЦНИИ МПС, Графский пер., 11.