

Осуществление первого из этих подходов позволит значительно расширить круг потенциальных потребителей тепловой энергии, производимой на установках ядерной энергетики, а также даст возможность внедрения атомной энергии в область промышленного теплоснабжения, которая нуждается в огромных количествах топлива. Разработка в СССР и Чехословакии показали, что для передачи тепла на дальние расстояния для промышленных потребителей экономически оправдана система переноса тепла в форме горячей воды под давлением от АЭС до места потребления. Затем горячая вода будет использована для производства пара нужных параметров на оборудовании потребителей (предпочтительно на термокомпрессорах)*. В настоящее время эта работа приближается к этапу технического осуществления. Второй подход в настоящее время находится на ранней стадии разработки, но найти ответ крайне важно, поскольку это помогло бы разрешить сразу две проблемы: во-первых, позволило бы продлить срок службы основного оборудования источника ядерной энергии и, во-вторых, дало бы возможность создать крупные источники централизованного теплоснабжения в течение короткого времени и при сравнительно низких затратах.

В заключение мы можем с уверенностью утверждать, что использование источников ядерной энергии для целей централизованного теплоснабжения представляет собой область, которая была достаточно технически изучена, нашла широкое практическое применение и многое обещает в будущем.

Ядерная энергетика в экстракции тяжелой нефти и ее обогащении

Технический обзор использования атомных электростанций для теплоснабжения нефтяной промышленности

Эрнан Карвахал-Осорио

Использование тепла для стимуляции добычи нефти стало широко применимым методом извлечения тяжелой нефти. Применяемый, главным образом, во вторичных и третичных процессах извлечения метод стимулирования добычи нефти теплом использовался также в первичном извлечении из нефтяного месторождения, что не соответствует обычным методам. Использование ядерных реакторов в качестве источника тепла неоднократно являлось предметом исследований, но никогда дело не доходило до реализации этой идеи, несмотря на сделанные в результате исследований выводы об экономической целесообразности ядерного варианта. Эта проблема не ограничивается одной экономикой. Во-первых, требуемые для извлечения тяжелой нефти температура и давление обычно выше, чем максимальные величины, получаемые на самых совершенных современных коммерческих реакторах (водоохлаждаемых реакторах как легководных, так и тяжеловодных). Если это не оправдывается в отношении какого-либо из разрабатываемых месторождений нефти, то вполне справедливо в отношении более глубоких формаций тяжелой нефти и более длительных путей движения тепла в месторождении, для которого должна быть использована атомная электростанция. Во-вторых, нефтяной рынок продолжает оставаться нестабильным, и потому опасности, связанные с долговременным капиталоемким ядерным

* Перенос нагретой воды на дальние расстояния для подачи пара потребителям", М.В. Сигал, В.Л. Гусаков, С.В. Длугосельский, *Теплоэнергетика* № 12 (1987 г.) (на русском яз.) и "Проблемы использования термокомпрессии водяного пара", И. Петровский, доклад на Симпозиуме по обмену опытом стран-членов СЭВ, сборник докладов, том 2, Прага, ноябрь 1986 г. (на русском яз.).

Г-н Карвахал-Осорио - инженер Физического центра при Венесуэльском научном институте в Каракасе.



проектом, неприемлемы. Более того, эксплуатация таких крупных месторождений, как на Аляске и в Северном море, а также обильное и постоянное поступление нефти по приемлемым ценам от участников Организации стран-экспортеров нефти (ОПЕК) и других стран позволяет не расходовать запасы тяжелой нефти. В-третьих, присущие атомной энергетике институциональные проблемы (безопасность, обращение с отходами, обеспечение топливом, принятие общественной ответственностью) продолжают создавать неблагоприятную атмосферу для ядерных предприятий в новых областях.

Тем не менее, общее мнение таково, что большая часть негативных факторов, связанных с атомной энергетикой, будет постепенно исчезать по мере исчерпания запасов нефти. Учитывая энергоемкость извлечения тяжелой нефти и соответствующих процессов ее обогащения, ядерная энергетика становится идеальной альтернативой, призванной играть важную роль благодаря своим характеристикам.

Извлечение и обогащение тяжелой нефти с помощью тепла

Основными методами, применяемыми при извлечении нефти с помощью тепла, являются: инжекция горячей жидкости, главным образом, горячей воды; инжекция пара для замачивания и отгонки, и сжигание in-situ. Другие методы, такие как инжекция горячего газа и глубинные генераторы пара, получили лишь ограниченное применение.

Помимо тепловой стимуляции для вторичного и третичного извлечения нефти применялись такие методы, как затопление водой, инжекция газа (главным образом, воздуха и CO_2), химические добавки и другие методы (микробный, электромагнитный, нагревание, добавление пены и т.д.), дающие различные результаты в зависимости от конкретных условий месторождения. Широкое распространение получило добавление разбавителей с тепловой стимуляцией или без нее, дающее возможность существенно уменьшить количество энергии, требуемой для вытеснения сырой нефти.

Методы тепловой стимуляции преобладают во всех зонах усиленной добычи нефти (УДН)*. Например, в США из всех проектов УДН, осуществлявшихся в 1988 г., 73 % — с применением тепловых методов. Венесуэла, вторая в западном полушарии страна, широко использующая УДН, применяет исключительно тепловую стимуляцию, так же как и Индонезия, являющаяся еще одним сторонником УДН. Предпочтительным методом тепловой стимуляции является инжекция пара ввиду его простоты, относительно низкой стоимости и эффективности в осуществлении имеющихся проектов.

* Термин УДН относится обычно к тем случаям, когда требуется применить дополнительную энергию в нефтяном пласте для получения значительных количеств дополнительной нефти. Он не относится к пластам, которые никогда не давали нефть, или из которых она не вытекает под собственным давлением, или которые требуют нагрева для выкачивания нефти. УДН предполагает, помимо тепловой стимуляции, любой другой путь добавления энергии нефтяному пласту.

Температура пара и давление для инжекции в нефтяные формации зависят от характеристик месторождения: глубины залегающих и проницаемости, а также от таких исходных качеств, как вязкость и вес. Температура около 350 °C и давление 12–17 МПа, пригодны для месторождений глубиной 500–1000 метров. Для более глубоких месторождений эффективность инжекции пара снижается, хотя улучшенная изоляция скважины и более высокие температура и давление позволяют разрабатывать и более глубокие пласты.

Экстракция сверхтяжелых нефти и битума и извлечение нефти из нефтеносных песков и сланцев требуют исключительно термальных методов*. После извлечения тяжелая нефть и битум должны пройти процесс обогащения, при котором удаляются примеси и повышается отношение водорода к углероду в молекуле с тем, чтобы получить продукты более высокого качества, чем при соответствующей обычной очистке. Тяжелой сырой нефти свойственны обычно сравнительно высокие концентрации серы и металлов (таких как ванадий и никель).

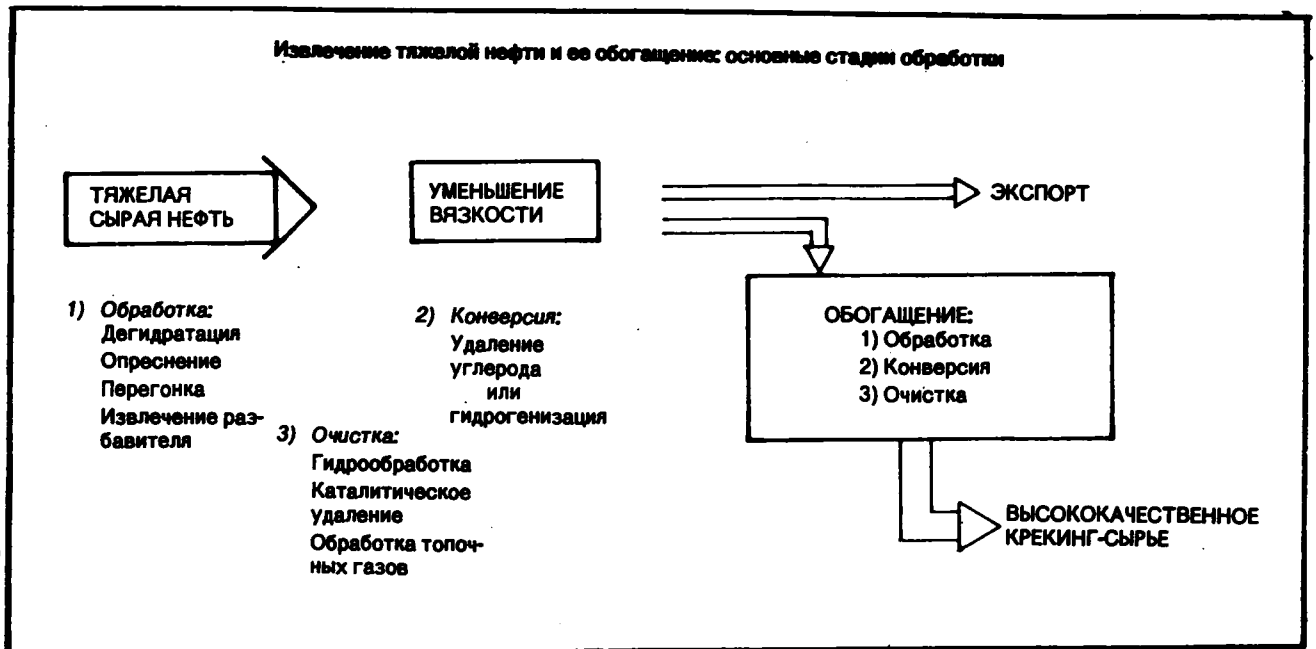
Обработка тяжелой нефти включает ряд операций (см. рисунок). Для увеличения в тяжелой нефти отношения водорода к углероду можно применять как метод сброса углерода, так и метод гидрогенизации, но последний предпочтительней для повышения скорости конверсии нефти и для увеличения выхода более легких сырых фракций. Однако гидрогенизация требует относительно больших количеств водорода, производство которого, в свою очередь, нуждается в больших количествах энергии.

Затраты на получение тяжелой нефти составляют 9–15 долл. США на баррель для экстракции тяжелой нефти и обработки нефтеносных песков, исключая Венесуэлу, где стоимость добычи тяжелой нефти достигает 5 долл. США за баррель*. Процесс обогащения может увеличить расходы еще на 10 долл. США или более в зависимости от конкретного проекта и требуемого уровня обработки.

Последние исследования министерства энергетики США показали, что если цены на нефть поднимутся к 2000 г. до 40–50 долл. за баррель, то в США будет добыто дополнительно $19,4 \cdot 10^9$ баррелей тяжелой нефти, т.е. почти в два раза больше, чем ее было получено в 1985 г. Однако те же исследования показали, что если цены на нефть повысятся к 2000 г. лишь в пределах от 12 долл. до 21 долл. за баррель, то уровень получения нефти с помощью теплового метода УДН, достигающий в настоящее время 500.000 баррелей в день, начнет понижаться.

Различие между тяжелой нефтью и битумом определено в 1982 г. Второй конференцией ИПИ ООН (Института подготовки и исследований ООН — UNITAR) следующим образом: если вязкость нефти при температуре бассейна ниже 10.000 сП, то это — сырая нефть, а если выше 10.000 сП, то это — битум. Сырая нефть классифицируется как сверхтяжелая, когда ее вес ниже 10 API; при весе 10–20 API — это тяжелая нефть, а при весе свыше 20 API — обычная нефть. Вес измеряется при температуре 15,6 °C.

* * Один баррель равен 0,159 м³.



А если цены на нефть сохранят прежнюю тенденцию к увеличению на 5 % и поднимутся к 2000 г. до 36 долл. США за баррель, то уровень производства с помощью тепловой стимуляции достигнет одного миллиона в день, т.е. намного увеличится при сжигании *in-situ*.

Запасы тяжелой нефти и стоимость энергии на ее добычу

Основные мировые запасы сырой нефти оцениваются в $2 \cdot 10^{12}$ баррелей. Из них 72 % приходится на Венесуэлу, а на другие страны, главным образом, Советский Союз, Соединенные Штаты Америки и Ирак, менее чем по 10 % на каждую.

Канада известна своими крупными месторождениями нефтеносных песков (классифицируемых в большинстве случаев как битумы), содержащими $2,95 \cdot 10^{12}$ баррелей нефти – количество, превышающее общие мировые запасы тяжелой нефти и составляющее около 82 % этих запасов. Из них примерно $5 \cdot 10^{11}$ баррелей тяжелой нефти и $2 \cdot 10^{11}$ баррелей битума считаются доступными при использовании известной технологии.

В СССР месторождения тяжелой нефти и битума оцениваются в $2 \cdot 10^{12}$ баррелей, из которых $0,5 \cdot 10^{12}$ считаются резервами. В настоящее время уровень добычи тяжелой нефти в СССР очень низок. Он составляет лишь 25 000 баррелей в день.

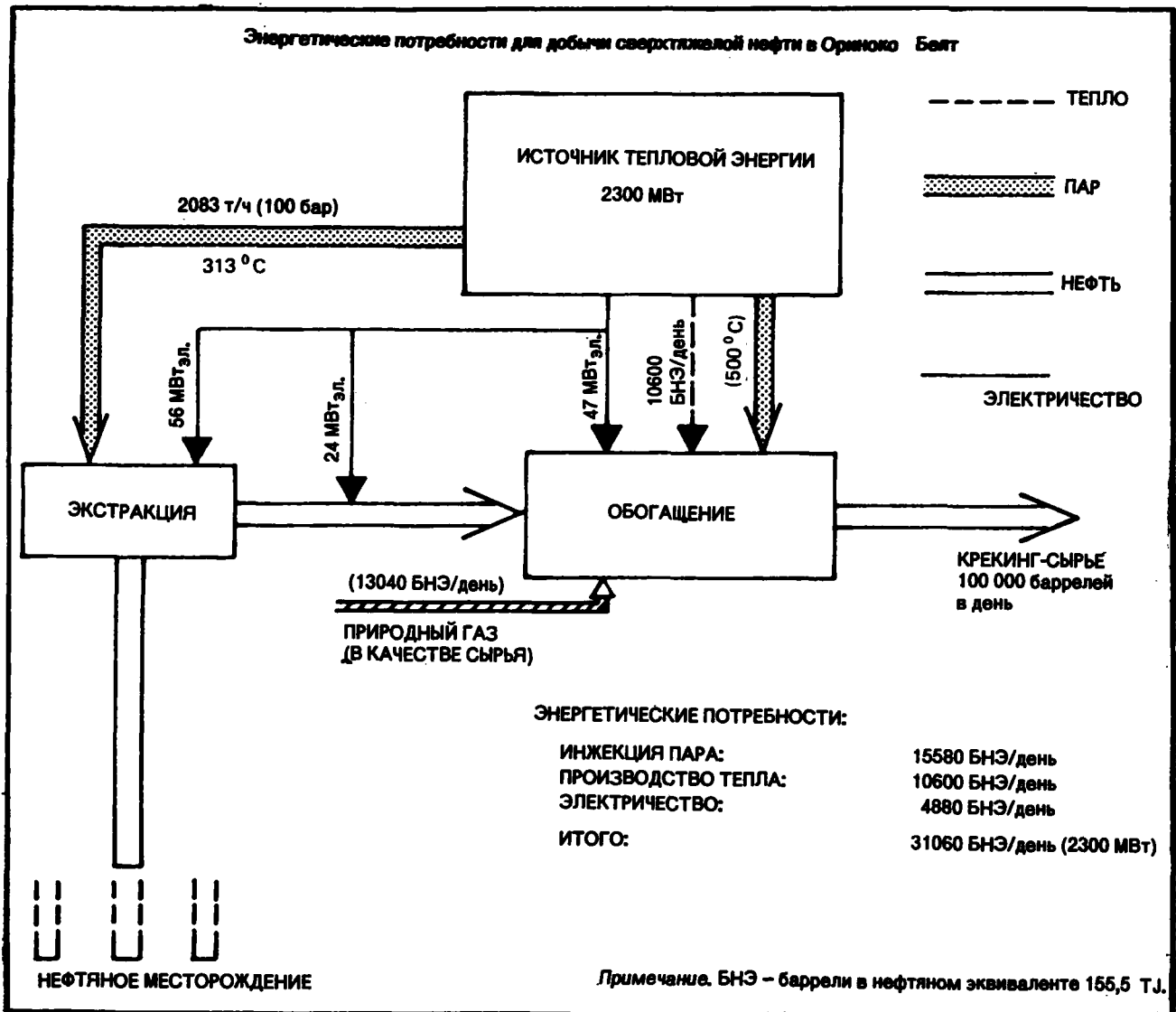
Месторождения нефтеносных сланцев также содержат значительные количества углеводородов. В нефтеносных сланцах сырая нефть содержится не в виде жидкости, а в виде керогена. Для превращения керогена в относительно легкую „сланцевую нефть” с выходом в 40–400 литров на тонну требуется нагрев до 370 °С. В настоящее время запасы нефтеносных сланцев в полной мере неизвестны,

но считаются значительными и распространенными по всему миру с наиболее крупными концентрациями в США и СССР и с существенными аккумуляциями в Китае и Бразилии. Только в США доступная сланцевая нефть оценивается в $1 \cdot 10^{12}$ баррелей нефти.

При добыче тяжелой нефти и разработке других необычных нефтяных ресурсов большое значение приобретает (как и в любой энергоемкой деятельности) экономика энергетического цикла. Если не уделять достаточного внимания энергетической проблеме, то возрастает перерасход энергетических ресурсов с увеличением влияния на окружающую среду и возможностью получения отрицательных балансов суммарной энергии (с учетом всех процессов).

Стоимость энергии в осуществляемых проектах добычи тяжелой нефти составляет примерно от одной пятой энергии, содержащейся в добываемой нефти (например, в Индонезии), до одной трети в более сложных проектах. Эти данные относятся лишь к процессу экстракции. Если включить еще и обогащение, то для комплексной модели добычи тяжелой нефти потребуется 40–50 % энергии, содержащейся в получаемой нефти. Это соотношение существенно меняется в зависимости от условий нефтяного промысла и характеристики сырой нефти. Производство водорода, необходимого для гидрогенерации сырой нефти, как части процесса обогащения, требует особого внимания, так как оно является наиболее энергоемкой стадией во всем этом процессе. Из существующих методов производства водорода наиболее широко применяются электролиз воды и паро-метановый реформинг. Последний метод, использующий в качестве сырья природный газ или другой углеводород, наиболее экономичен.

Были определены, например, энергетические потребности для экстракции и предварительной



обработки сверхтяжелой нефти „Венесуэлен Ориноко ойл белт” (см. рисунок). Общие затраты энергии, включая использование природного газа в качестве сырья для производства водорода, составляют около 44 % эквивалента энергии, содержащейся в произведенной продукции.

Потребление энергии при экстракции тяжелой нефти с помощью инжекции пара определяется соотношением нефть-пар (СНП) (иногда – наоборот), выражаемым баррелями нефти на тонну пара. Для совершенной энергетической экономики и сокращения затрат желательны высокие соотношения. В некоторых случаях пар вводится сначала циклически, т.е. ровно столько, сколько требуется для увеличения выхода нефти, с использованием тех же частей производственных скважин в качестве инжекторов. Эта стадия называется промывочным производством. Когда добыча на месторождении начинает значительно уменьшаться, тогда осуществляется постоянная инжекция пара до тех пор, пока эксплуатация данного месторождения становится нерентабельной. Эта стадия называется разгонкой.

При переходе от первой ко второй стадии требуется резкое увеличение инжекции пара с соответствующим существенным понижением СНП. Обычно это – 25 баррелей на тонну в промывочной стадии и 5 или меньше при паровой разгонке. В США СНП, превышающее 1,6 баррелей на тонну в проектах УДН при сжигании обычного ископаемого топлива для производства пара, считается выгодным.

Ядерная энергетика в извлечении тяжелой нефти: проведенные исследования и положение дел

Новая технология, связанная с извлечением тяжелой нефти с помощью ядерной энергии, должна будет пройти в своем развитии процессы адаптации и оптимизации. Производство большого количества пара с довольно высокими температурой и давлением, недорогая обработка больших количества сырой воды, проблемы стабильности грунта, оптимизация работы многоцелевой ядерной установки – вот некоторые из основных задач, требу-

ющих решения. Кроме того, характеристики месторождений нефти и ее свойства различны в разных месторождениях, что ведет к различию в потребностях в количестве пара и в его параметрах. Может также оказаться, что время эксплуатации нефтяного месторождения будет более коротким, чем срок жизни реактора.

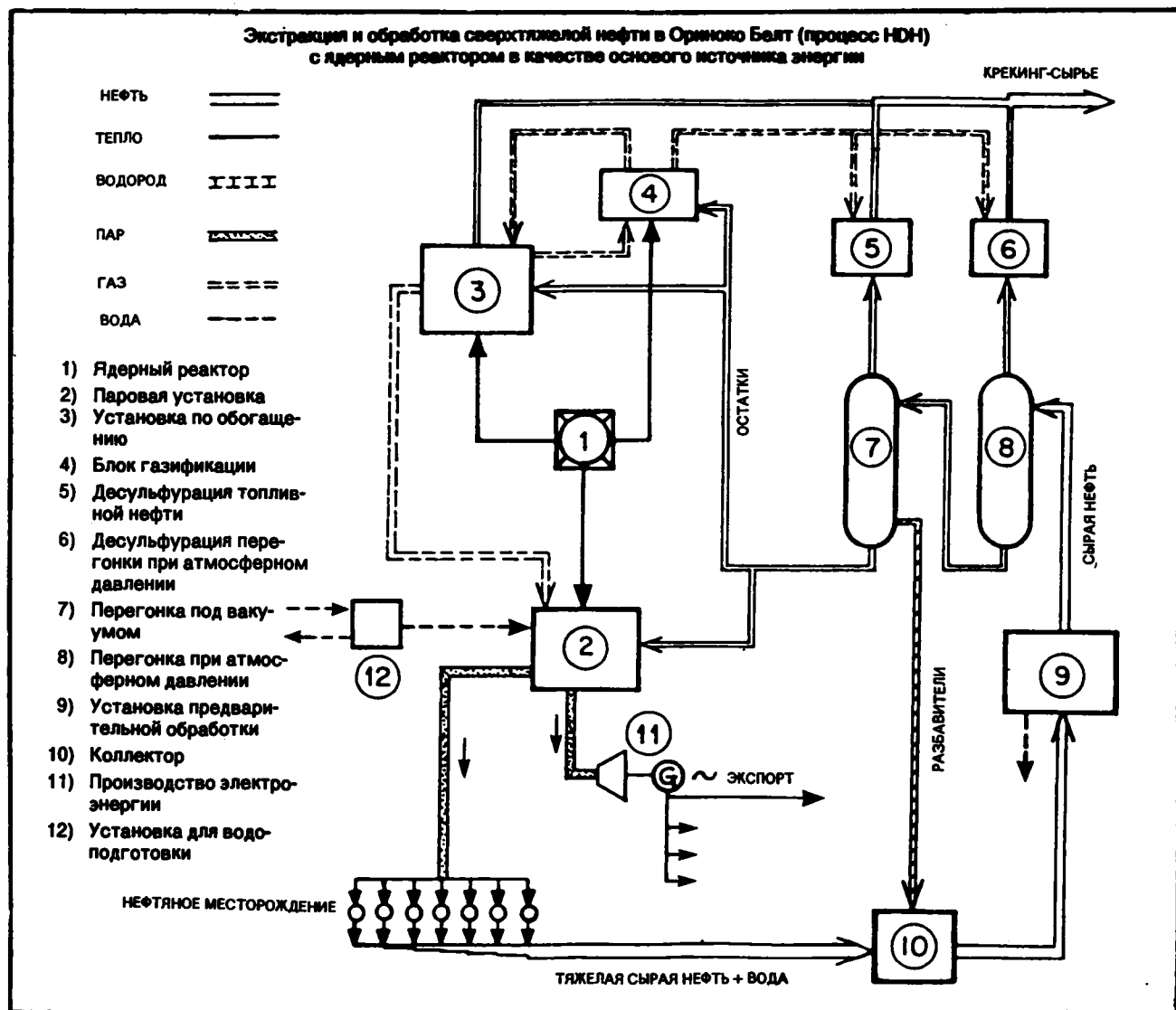
Многие из этих аспектов делают невозможной стандартизацию конструкций и строительства атомных электростанций, которая позволила бы сократить расходы. Тем не менее, могут быть стандартизованы ядерная система снабжения паром и другие компоненты станции.

В Канаде изучался вопрос об использовании ядерной энергетики с реакторами Канду для экстракции тяжелой нефти из нефтеносных песков путем инъекции пара. При проведении этого исследования (1980 г.) предполагалось, что возможно достижение экономии средств на 25-50 % по сравнению со сжиганием угля. Органически охлаждаемый реактор Канду предлагался для месторождений нефтеносных песков с глубиной залегания свыше 650 метров, когда требуются высокие дав-

ления пара. Однако, как уже отмечалось, канадский реактор несмотря на его преимущества перед легководными (LWR) и тяжеловодными (HWR) реакторами, ограничен в способности обеспечивать температуру и давление пара, требуемые для извлечения нефти из глубоких месторождений.

В 1981 г. фирма „Дженерал электрик компани“ (Великобритания) предложила для извлечения нефти реактор Магнокс. Весьма привлекательными, особенно для развивающихся стран, оказались такие особенности этого реактора, как использование им в качестве топлива природного урана и применение простых материалов при его изготовлении. Но у него имеются и недостатки: слабое использование реактором ресурсов урана и образование в нем сравнительно крупных количеств плутония.

Фирмы „Дженерал атомикс“ (США), „Юропиен АСЕА- Браун Бовери“ и несколько позже „Сименс“ (Федеративная Республика Германия) провели широкие исследования по конструированию и применению высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (HTGR) для УДН, включая извлечение тяжелой нефти. СССР, Китайская Народная Респуб-



лика и Японии также проводили исследования по конструированию реакторов HTGR для производства тепла, причем две первые из названных стран делали это в расчете на их использование для извлечения тяжелой нефти.

Реакторы типа HTGR способны производить тепло и пар с более высокими температурой и давлением, чем это требуется для извлечения тяжелой нефти. Таким образом, они способны производить высококачественный пар как для получения электроэнергии, так и для его инъекции. Такая когенерационная схема придает работе станции многоцелевой характер, поскольку изменения в потребностях в паре для нефтяного месторождения дают возможность переключить пар на производство электричества, часть которого может пойти на нужды станции, а излишек — на экспорт.

При извлечении тяжелой нефти, требующем больших количеств пара, его отбор непосредственно из вторичного цикла невозможен, так как вода в этом цикле должна быть высокой чистоты и качества, а следовательно, водоподготовка будет стоить намного дороже, чем это требуется для инъектируемого пара. Однако эта проблема решается путем использования ребойлеров, разумеется, с дополнительными затратами и незначительными потерями, связанными с условиями инъекции пара.

Имеется широкомасштабная схема использования атомной энергии как для извлечения, так и для обогащения нефти; она соответствует процессу НДН для венесуэльской сверхтяжелой нефти (см. рисунок). В этой схеме реактор HTG может, наряду с инъекцией пара при высоком давлении, удовлетворить большую часть потребностей в тепле с температурами в пределах 500–700 °С. Более высокая температура (900 °С и выше), полученная с разрабатываемыми усовершенствованными вариантами реактора HTGR (Япония и другие страны), дала бы возможность использовать тепло не только для производства пара и электроэнергии, но и для получения водорода на паро-метановой установке. Уделяемое в последнее время внимание модульным вариантам HTGR небольшой мощности способствует обеспечению большей гибкости в отношении потребностей нефтяного месторождения, позволяет устанавливать различные коэффициенты для различных видов работ и делает режим эксплуатации и безопасности более благоприятным.

Рассматривались проекты других реакторов для производства тепла. Для добычи тяжелой нефти в будущем могут найти применение жидкометаллические реакторы, способные давать температуру 500 °С, особенно их небольшие модульные варианты, разрабатываемые в США.

В настоящее время разрабатываются концепции современных реакторов для коммерческого применения, активная зона которых могла бы выдерживать самые неблагоприятные обстоятельства при очень малой степени риска, даже при достижении температуры плавления топлива (т.е. в случае аварии исключается значительный выброс продуктов деления).

С экономической точки зрения проведенные исследования показали преимущества атомной энергии перед органическим топливом, включая остатки угля и нефти. Например, исследования, проведенные фирмой „Дженерал атомикс“ (США) в 1983 г. по применению HTGR тепловой мощностью 1170 МВт для экстракции нефти из сланцев путем

непосредственной перегонки пара, определили цену в 41 долл. США (доллары 1983 г., 30-летнее нивелирование) за баррель обогащенной нефти из сланцев для станции, которая вступит в эксплуатацию в 2005 г. По другим, не связанным со сланцами проектам добычи нефти, экономический анализ может показать более благоприятные эксплуатационные расходы.

Тем не менее, трудно конкурировать с методом сжигания обогащенных нефтяных остатков очень низкой коммерческой стоимости. Эти остатки содержат крупные концентрации примесей (сера, азот), безусловно оказывающие при сгорании вредное воздействие на окружающую среду. При наличии жесткой экологической регламентации может оказаться необходимым запретить сжигание таких остатков или использовать дорогостоящее оборудование для удаления примесей. Отсутствие таких недостатков у атомной энергетики благоприятствует ее применению.

Прогнозы нефтяного рынка показывают, что в начале следующего столетия цены на нефть возрастут до уровня указанной выше цены. Таким образом, извлечение тяжелой нефти с помощью ядерной энергии имеет реальные шансы на существование в не столь отдаленном будущем.

Перспектива применения атомной энергетики

Исследования по использованию атомной энергии в качестве источника тепла для добычи тяжелой нефти показали, что даже при благоприятных условиях нефтяного рынка ядерный выбор имеет экономические и экологические преимущества перед обычными методами.

Однако для того, чтобы приступить к осуществлению проекта по добыче нефти с помощью ядерной энергии, любая страна должна принять твердое решение, основанное на реалистической энергетической политике и хороших условиях нефтяного рынка, ввиду необходимости крупных инвестиций и большого экономического риска. Крупные иностранные долги многих стран препятствуют реализации решений, требующих крупных капиталовложений, таких как ядерный выбор, до тех пор, пока не будут созданы особые условия.

Разработка следующего поколения атомных электростанций, а некоторые из них уже сегодня технологически готовы и способны производить тепло и пар с достаточно высокими температурой и давлением, чтобы обеспечить процессы извлечения тяжелой нефти и ее обогащения, открывает совершенно новые перспективы использования атомной энергии в нефтяной промышленности. Благодаря совершенной конструкции и характеристикам безопасности реакторы HTGR подходят для такого использования.

Ядерная альтернатива может существенно увеличить важные нефтяные ресурсы при уменьшении воздействия на окружающую среду и высоких нормах безопасности, способствуя развитию многих народов путем увеличения снабжения нефтью для незаменимых видов ее использования. Сегодняшняя тенденция к повышению безопасности новейших конструкций ядерных реакторов, безусловно, окажет позитивное влияние на развитие процессов, осуществляемых с помощью ядерной энергии, включая добычу тяжелой нефти.